

MIKA SILVAST  
ANTTI NURMIKOLU

## Maatutkamenetelmän soveltaminen ratarakenteen kunnossapito- ja parantamissuunnittelussa





Mika Silvast, Antti Nurmikolu

# Maatutkamemetelmän soveltaminen ratarakenteen kunnossapito- ja parantamissuunnittelussa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2015

*Kannen kuva: Jani Irvankoski*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-088-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000



**Mika Silvast ja Antti Nurmikolu: Maatutkamenetelmän soveltaminen ratarakenteen kunnossapito- ja parantamissuunnittelussa.** Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2015. 99 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-088-9.

**Avainsanat:** maatutka, rata, tukikerros, alusrakenne, pohjamaa, kiviaines, rakeisuus, hienoaaines, routivuus

## Tiivistelmä

Maatutkaluotaus on nopea ainetta rikkomaton geofysikaalinen tutkimusmenetelmä, jonka sovellusmahdollisuudet ratarakenteiden kunnan arvioinnissa ovat kehittyneet viime vuosikymmenen aikana merkittävästi. Tämä on seurausta sekä maatutkalaitteistojen ja mittausaineiston analyysimenetelmien kehityksestä että tietoaaineistojen yhteistarkastelun myötä tapahtuneesta suunnittelun tehostumisesta. Tässä julkaisussa kuvataan maatutkamenetelmää, sen erilaisia sovelluksia ratarakenteiden tutkimuksessa ja rataa koskevien eri tietoaaineistojen integroinnin tarjoamia merkittäviä etuja.

Maatutkaluotauksen avulla on jo pitkään määritetty luotettavasti radan ja sen rakennekerrosten paksuuksia. Erityisesti signaalin taajuussisällön tutkimuksessa saavutettu kehitys on mahdollistanut myös tukikerroksen, alusrakenteen ja pohjamaan laadun tarkastelun. Nykyisellään maatutkalla voidaan määrittää tukikerroksen rakeisuusindeksi ja tarkastella kuivatuksen toimivuutta sekä materiaalien hienoaainespitoisuutta ilmentävää veden pidättymistä alusrakenteeseen ja pohjamaan.

Pistemäisiin rakenteen tutkimusmenetelmiin verrattuna maatutkauksen keskeisimmät edut ovat ainetta rikkomattomuuden myötä helppous ja kyky tuottaa jatkuvaa dataa. Rataympäristössä muun muassa kiskoista aiheutuvat häiriöt kyetään poistamaan rakenteiden tietosisältöä kadottamatta oikeaoppisilla mittausaineiston prosessoinneilla. Menetelmän rajoituksiin kuuluu heikko syvyyssulottuvuus hienorakeisessa pohjamaassa, mikä ei kuitenkaan heikennä pohjamaan yläpuolelta saatavan aineiston laatua. Radan rakennekerrosten ja pohjamaan tarkastelun lisäksi maatutkauksella voidaan arvioida myös erilaisten erikoisrakenteiden, kuten paalulaatta- ja -hatturakenteiden kuntoa. Olemassa olevien ratojen korjaus-suunnitteluun tähtäävien tutkimusten lisäksi menetelmä sopii hyvin uusien tai parannettujen ratojen töiden laadunvarmistukseen muun muassa rakennepaksuuksien, tukikerroksen hienontuneisuuden, routalevyjen asennuksen ja siirtymärakenteiden olemassa olon osalta.

Kehittyneet suunnitteluohjelmistot luovat edellytykset maatutkan tuottaman rakennetiedon yhdistetylle tarkastelulle eri lähteistä saatujen mittausaineistojen, kuten raiteentarkastustietojen, radan kunnossapito- ja vauriotietokantojen, laserkeilaustiedon, ratavideon ja kartta-aineistojen kanssa. Tämä on luonut kokonaan uudentyyppisen suunnittelujärjestelmän radan epätasaisuuksina ilmenevien ongelmien paikantamiseen, rakenteellisten syiden tunnistamiseen ja täsmälliseen korjaustoimenpite-suunnitteluun. Kehitys luo edellytykset suunnata radanpitoa laajojen rataosuuksien perusparantamisesta ”vähemmällä enemmän” -ajattelun mukaiseen pahimpien ongelmapaikkojen täsmäkorjaukseen.

**Mika Silvast och Antti Nurmikolu: Tillämpning av georadarmetoden i bankonstruktionernas underhålls- och utvecklingsplanering.** Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 21/2015. 99 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-088-9.

## Sammanfattning

Georadaranalys är en snabb geofysikalisk undersökningsmetod som inte sonderdelar material och som i allt högre grad kan användas i bedömningen av bankonstruktionernas skick. Detta beror på utvecklingen av analysmetoder relaterade till georadarutrustning och mätdata samt på effektiviseringen av planeringen till följd av integrering av datamaterial. I denna publikation beskrivs georadarmetoden, olika tillämpningar av den i undersökning av bankonstruktioner och de betydande fördelar som integreringen av olika datamaterial medför.

Med hjälp av georadaranalyser har man sedan länge tillförlitligt fastställt banans och dess konstruktionslagers tjocklekar. Den utvecklingen som skett särskilt i analysen av signalens frekvensinnehåll har även gjort det möjligt att undersöka stödlager, underbyggnader och undre jordlager. I dag kan man med hjälp av georadar fastställa stödlagrets kornighetsindex och följa upp hur torkningen framskrider samt materialens finmaterialhalt som anger hur väl vattnet absorberas i underbyggnaden och undre jordlager.

Jämfört med punktundersökningsmetoder för konstruktioner är de största fördelarna med georadaranalyser att de är lätta att använda eftersom de inte sondrar material och tar fram fortlöpande data. Bland annat de störningar som skenor orsakar i banmiljöer kan elimineras utan att förlora data om konstruktionerna om mätresultaten processas korrekt. En svag sida hos metoden är att den inte sträcker sig så djupt i finkorning markgrund, men detta försämrar dock inte kvaliteten hos de data som erhålls ovanför markgrunden. Utöver att analysera bankonstruktioner och markgrunden kan man med georadar även bedöma skicket hos olika specialkonstruktioner, såsom pålplattor och tryckplattor. Förutom för analyser relaterade till reparationsplaner för befintliga banor är metoden mycket användbar i kvalitetssäkringen av nya eller förbättrade banor bland annat avseende konstruktionstjocklek, stödlagers finfördelning, montering av tjälskydd och befintliga överföringskonstruktioner.

Utvecklade planeringsprogram skapar förutsättningar för integrering av georadarbaserade konstruktionsdata från olika källor, såsom rälsinspektionsdata, banors underhålls- och skadedatabaser, laserskanningsdata, banvideor och kartmaterial. Detta har skapat ett helt nytt planeringssystem för lokalisering av problem som framträder som ojämnheter i banan, identifiering av strukturella orsaker och exakt planering av reparationsåtgärder. Utvecklingen skapar möjligheter att rikta banhållningen från omfattande grundförbättringar av långa bansträckor till exakt lokaliserade förbättringar av de värsta problemen enligt filosofin ”mera med mindre”.

**Mika Silvast and Antti Nurmikolu: Applying the Ground Penetrating Radar Method to Track Structure Maintenance and Rehabilitation Planning.** Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 21/2015. 99 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-088-9.

## Summary

Ground Penetrating Radar (GPR) is a fast, non-destructive geophysical method whose potential applications in the assessment of track structure condition have significantly increased in the last decade. This is a result of developments in GPR devices, methods of analyzing the measurement data, and of greater planning efficiency due to combined data analysis. This publication describes the GPR method, its various applications to track structure assessment, and the substantial benefits of integrating various track-related data resources.

GPR has long been used for reliably determining the thickness of structural layers. In particular, developments in studies based on signal frequency content have enabled the assessment of the ballast layer, substructures and subgrade soil quality. At the moment, GPR can be used to determine the fouling index of the ballast layer and to assess the efficiency of drainage and retention of water in the substructure and subgrade soil, indicating the fines content of the materials.

Compared to single-point structure assessment methods, the key benefits of GPR include its non-destructiveness, which enables easy and continuous production of data. In track environments, anomalies caused by the tracks, for example, can be eliminated without compromising the content of data on other structures by processing the measurement data in the appropriate manner. GPR's limitations include its poor depth penetration in fine-grained subgrade soils. However, this does not compromise the quality of data obtained from above the subgrade soil. The method can be used for planning repair works on existing tracks and for quality assurance purposes during the construction of new tracks or rehabilitated sections. GPR provides valuable information such as the thickness of structure layers, the degradation of the ballast layer, the location of insulation boards, the existence of transition structures and to assess the condition of various special structures such as pile slab and pile cap structures.

Advanced planning software enables the integration of structural data from GPR assessments with measurements from different sources (such as track inspections, track maintenance and damage databases, laser scanning, track videos, and maps) for analysis purposes. As a result, a completely new planning system has emerged for locating problems that manifest in the form of uneven tracks, for identifying structural problems and for making detailed repair plans. This development lays the groundwork for making the shift from extensive track section improvement works to a "more for less" approach which translates into targeted repairs of the most problematic sections.

## Esipuhe

Maatutkaluotauksesta on viime vuosina tullut yleisesti käytetty tutkimusmenetelmä ratarakenteiden kerrospaksuuksien ja laatuominaisuuksien määrittämisessä. Tämän sovellusohjeen tavoitteena on kuvata tällä hetkellä Suomessa Liikenneviraston ratarakenteiden maatutkamittauksista saatavia tuloksia sekä ohjeistaa niiden hyödyntämisessä ratarakenteen kunnossapito- ja korjaussuunnittelun tukena.

Sovellusohjeen ovat laatineet geofyysikko Mika Silvast ja tekn. tri Antti Nurmikolu. Työn ohjauksesta on vastannut Erkki Mäkelä Liikennevirastosta.

Helsingissä huhtikuussa 2015

Liikennevirasto  
Kunnossapito-osasto

# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	9
2	MAATUTKAN MENETELMÄKUVAUS .....	10
2.1	Taustaa menetelmästä .....	10
2.2	Maatutkan fysikaaliset perusteet .....	11
2.2.1	Yleistä .....	11
2.2.2	Sähkönjohtavuus.....	11
2.2.3	Dielektrisyys.....	11
2.3	Maatutkan toimintaperiaate.....	12
2.3.1	Menetelmäkuvaus .....	12
2.3.2	Heijastuskerroin ja polariteetti.....	13
2.3.3	Syvyysulottuvuus ja erotuskyky .....	14
2.4	2.4 Maatutkalaitteistot .....	16
2.4.1	2D-pulssitutka .....	16
2.4.2	3D-askeltaajuustutka .....	18
2.5	Mittausnopeus .....	20
2.6	Menetelmän rajoitukset ja häiriötekijät .....	21
2.7	Mittausten toteutus.....	24
2.8	Maatutka-aineiston käsittely ja prosessointi .....	26
2.9	Maatutkauksen yhteydessä tehtävät mittaukset .....	29
2.9.1	Yleistä .....	29
2.9.2	GPS ja ratavideo .....	29
2.9.3	Laserkeilaus .....	31
2.10	Mittausaineiston käsittelyohjelmistot.....	35
3	RAKENNERAJOJEN TUTKIMUKSET .....	38
3.1	Rakennerajatutkimusten tarve.....	38
3.2	Rakennerajojen tulkinta .....	39
3.2.1	Tulkinnan perusteet.....	39
3.2.2	Tukikerros.....	39
3.2.3	Alusrakenteen ja pohjamaan rajapinta .....	41
3.2.4	Pengertäytteen ja pohjamaan rajapinta.....	42
3.2.5	Kerrospaksuustulkintojen tarkkuus.....	43
3.3	Rakennerajatutkimusten muut sovellukset .....	45
3.3.1	Routalevyjen paikannus.....	45
3.3.2	Kallioleikkauspohjan tutkimukset.....	46
3.3.3	Pengerpaalurakenteet ja siirtymälaatat.....	48
3.3.4	Uusien rakenteiden laadunvarmistus.....	50
3.4	Rakennekerrospaksuuksien esittämisformaatit .....	51
4	TUKIKERROKSEN KUNNON TUTKIMUKSET .....	54
4.1	Tukikerroksen kunnon tuntemisen merkitys.....	54
4.2	Teoreettinen perusta .....	55
4.3	Rakeisuusindeksiluokitus .....	58
4.4	Rakeisuusindeksitulosten esittämisformaatit .....	59
4.5	Rakeisuusarvosana .....	61
4.6	Uuden ja puhdistetun tukikerroksen laadunvalvonta.....	63



5	ALUSRAKENTEEN JA POHJAMAAN LAADUN TUTKIMUKSET .....	65
5.1	Alusrakenteen ja pohjamaan laatu .....	65
5.1.1	Alusrakenteen ja pohjamaan laadun arviointitarve .....	65
5.1.2	Materiaalien laadun yhteys routimiseen .....	65
5.1.3	Routasuojaus ja routimisongelmien syyt .....	66
5.2	Pohjamaan laadun arviointi rajapintaheijasteen voimakkuudesta .....	68
5.3	Maamateriaalien laadun arviointi maatutka-aineiston taajuussisällöstä .....	70
5.4	Heijasteen taajuussisällön vuodenaikaisvaihtelun hyödyntäminen routimistutkimuksissa .....	73
6	MAATUTKAUSTIEDON INTEGROINTI MUUHUN TIETOAINEISTOON .....	79
6.1	Rekisteritietojen yhdistäminen .....	79
6.2	Routaongelmien syyarviointi eri aineistojen yhdistetyn tarkastelun avulla ....	87
6.2.1	Yleistä .....	87
6.2.2	Epäjatkuvuuskohdat .....	88
6.2.3	Riittämätön rakennepaksuus .....	89
6.2.4	Maaleikkausten ja pengerten rajakohdat .....	90
6.2.5	Routiva alusrakenne ja pohjamaan sekoittuminen .....	91
6.2.6	Jauhaantuminen tukikerroksessa .....	92
6.2.7	Vanhat vettyneet routaeristeet .....	93
6.2.8	Vaihtelevat pohjasuhteet .....	94
6.2.9	Kuivatuksen ongelmat .....	95
6.2.10	Muut ongelmat .....	96
7	YHTEENVETO .....	97
	VIITTEET .....	99

# 1 Johdanto

Suomen rataverkko on vanhimmilta osiltaan yli 150-vuotias. Ratojen rakentamisen ja kunnossapidon eri vaiheissa on käytetty useita rakennusmenetelmiä ja erilaatuisia rakennemateriaaleja. Radan rakennekerrosten hyvä toiminnallinen kunto on raiteen tasaisuuden ja siten raideliikenteen sujuvuuden edellytys. Akselipainojen ja liikennöintinopeuksien nosto sekä ratarakenteiden korjaussuunnittelu vaativat tarkkoja tutkimuksia ratarakenteiden tilasta. Myös radan kunnon tehokkaassa ylläpidossa tarvitaan tietoa radan nykyisistä rakenteista, ongelmakohteista ja niiden aiheuttajista. Ennakoivalla kunnossapidolla ja täsmäpaikantamalla vaurioiden sijainti sekä määrittämällä vaurioiden perimmäiset syyt voidaan ongelmakohteiden kunnossapito- ja korjaustoimenpiteet tehdä kustannustehokkaasti ja kestävästi.

Maatutkaluotausmenetelmää on käytetty rutiininomaisesti 2000-luvun alkupuolelta lähtien vanhojen ratojen uudistamis- ja parantamissuunnittelun lähtötietojen hankinnassa. Menetelmä on yleistynyt niin, että nykyisin käytännössä lähes kaikki Liikenneviraston ratahankekohteet tutkitaan maatutkalla. Maatutkalla voidaan tutkia ratarakenteita ja kartoittaa niiden vaurioita jatkuvana profiilina. Mittaustekniikan kehittymisen myötä markkinoille on tullut viime vuosina tehokkaita maatutkaluotauskalustoja. Niillä voidaan kerätä nopeasti tietoa ratarakenteiden kerrospaksuuksista, rakennemateriaalien ominaisuuksista sekä erikoisrakenteista. Mittausaineistojen käsittely- ja analysointiohjelmistojen kehitys on myös osaltaan laajentanut tulosten sovellusmahdollisuuksia. Kerättyä aineistoa on käytetty lähinnä routakorjaussuunnittelussa, kerrospaksuuksien määrittämisessä, paalurakennekartoituksissa sekä tukikerroksen kunnon tutkimuksissa.

Tässä sovellusohjeessa esitellään kootusti maatutkauksen teoriaa, mittalaitteita ja aineiston käsittelyssä käytettäviä ohjelmistoja sekä maatutkamenetelmällä saatavia tuloksia ratarakenne- ja pohjamaatutkimuksissa sekä erikoisrakenteiden kartoituksissa. Ohjeen esimerkeissä tuodaan esiin myös muiden tietoaaineistojen ja maatutkaustiedon yhdistetyn analyysin hyötyjä. Maatutkauksen avulla määritettyjen tulosten luotettavuutta on tarkasteltu vertaamalla niitä muun muassa näytetutkimuksiin, maaperäkairauksen tuloksiin ja pohjamaakarttoihin. Julkaisussa on esitetty myös menetelmäkuvaus siitä, miten maatutkaluotausten tiedonkeruu rataolosuhteissa tulee tehdä, miten mittausaineisto tulee prosessoida ja tulkita sekä miten mittaus tulokset tulee sitoa ratakilometreihin tai muihin paikkatietojärjestelmiin.

Ohjeen sisältö koostuu seitsemästä luvusta, joista johdannon jälkeisessä toisessa luvussa esitellään taustaa menetelmän käytöstä rautatietutkimuksissa sekä maatutkan menetelmäkuvaus. Kolmannessa luvussa keskitytään erityyppisten rakenteiden rajapintojen määrittämiseen maatutkalla. Neljäs luku esittelee menetelmän käyttöä tukikerroksen kunnon tutkimuksissa, ja viidennessä luvussa kuvataan maatutkan soveltamisesta alusrakenteen ja pohjamaan laadun tutkimuksissa erityisesti routivuuden tutkimisen näkökulmasta. Luku kuusi sisältää yhdistetyn aineistotarkastelun esimerkkejä edellisissä luvuissa havainnollistettujen sovellusten tuloksia hyväksi käyttäen.

## 2 Maatutkan menetelmäkuvaus

### 2.1 Taustaa menetelmästä

Rautatietutkimukset ovat olleet nopeimmin kasvanut ala maatutkan käytössä viime vuosina. Suomessa maatutkan soveltuvuutta rautateillä kokeiltiin ensimmäisen kerran 1980-luvun puolivälissä. Hitaasta mittaussnopeudesta ja silloisesta aineiston prosessoinnin puutteista johtuen tulokset eivät kuitenkaan olleet vaikuttavia. 1990-luvun lopulla maatutka alkoi saavuttaa laajemman hyväksynnän rautatierakenteiden tutkimusmenetelmänä. Muun muassa Itävallassa, Italiassa, Sveitsissä, Saksassa ja Iso-Britanniassa raportoitiin tuolloin menestyksekkäistä tuloksista koskien maatutkan käyttöä ratarakenteiden tutkimuksissa. Euroopan lisäksi Yhdysvalloissa tehtiin maatutkakokeiluja paikallisen ratahallinnon toimesta. Suomessa maatutkaluotausten laajempi käyttö ratatutkimuksissa aloitettiin 2000-luvun alussa.

Maatutkan käyttö on laajentunut radan rakennekerrosten paksuuden mittauksista myös rakennekerrosten ja pohjamaan laadun tutkimuksiin ja sitä käytetään myös materiaalien muodonmuutosominaisuuksien määrittämisen apuna. Maatutkasovellukset rautateillä voidaan jaotella seuraavasti a) raidesepelitutkimukset, b) geotekniset tutkimukset, c) uuden tai kunnostetun ratarakenteen laadunvarmistus ja d) erikoistutkimukset, kuten esimerkiksi paalurakenne-, tunneli- ja ratasiltatutkimukset.

Hyvälaatuisen maatutka-aineiston kerääminen rautateiltä ei ole ongelmatonta. Kiskot ja erityisesti betonipölkkyt aiheuttavat häiriöitä ja vaikeuttavat aineiston tulkintaa. Myös radan sähköistyslaitteet ovat aiheuttaneet häiriöitä maatutka-aineistoon suojaamattomia antennoja käytettäessä. Tämä ongelma on kuitenkin ratkaistu käyttämällä erityistä radalle sopivaa antennikonfiguraatiota. Lisäksi hidas mittaussnopeus (max. 10 km/h) on aiemmin aiheuttanut ongelmia muun muassa mittausaikataulujen sovittamisessa muuhun liikenteeseen. Laitteistojen prosessointinopeuden kasvun ansiosta nykyisillä maatutkakalustoilla mittaukset voidaan kuitenkin suorittaa ilman ongelmia suurella nopeudella (max. 160 km/h).

Rautateillä rakenteen käyttäytymisen arviointiin parhaiten soveltuvat tutkimustulokset on saavutettu, kun maatutkatuloksiin on yhdistetty muilla rakennetta rikkomat-  
tomilla menetelmillä saatuja tuloksia. Ruotsissa ratarakenteen tasonnoston suunnittelun yhteydessä maatutkamittaustuloksia on yhdistetty jatkuvan radan jäykkyyttä mittaavan kuormituslaitteen (Rolling Stiffness Measurement Vehicle) kanssa. Useassa maassa on tehty myös maatutkan ja ratageometrian mittaustulokset yhdistäviä tarkasteluja, jolloin maatutkasta saadut rakenneominaisuudet on voitu yhdistää radan toiminnalliseen kuntoon.

Maatutkaluotausten suurin etu on sen tuottama jatkuva profiili tutkittavasta kohteesta. Lisäksi mittaukset voidaan tehdä liikkuvasta mittausajoneuvosta muuta liikennettä häiritsemättä. Viime vuosien aikana maatutkatekniikkaa on alettu käyttää integroidusti muiden ratatutkimusmenetelmien kanssa. Uusimpia maatutkan ratasovelluksia ovat radan rakennemateriaalien laadun tutkimukset. Myös uusien ja perusparannettujen ratarakenteiden laadunvalvontamittaukset ovat viime aikoina voimakkaasti kehittyneet.

## 2.2 Maatutkan fysikaaliset perusteet

### 2.2.1 Yleistä

Maatutkaluotaus on ainetta rikkomaton geofysikaalinen maaperän sekä maa- ja pohjarakenteiden tutkimusmenetelmä, joka perustuu radiotaajuisten sähkömagneettisten (SM) aaltojen käyttöön. Yleisesti käytetty taajuusalue on 10–3000 MHz. Kyseisellä taajuusalueella SM-aallon voidaan olettaa etenevän aaltolina sähköisesti eristeisessä väliaineessa. Väliaineen ominaisuudet vaikuttavat aallon etenemiseen ja sen käyttäytymiseen. Maatutkasignaaliin vaikuttavia fysikaalisia parametrejä ovat väliaineen sähkönjohtavuus, dielektrisyys ja magneettinen susceptibiliteetti. Suomessa rata-rakennemateriaalien ja pohjamaan magneettinen susceptibiliteetti ei aiheuta eroja maatutkasignaalin etenemiseen.

### 2.2.2 Sähkönjohtavuus

Väliaineen sähkönjohtokyky ( $\sigma$ ), eli sähkönjohtavuus, kuvaa vapaiden varausten liikumista väliaineessa. Ulkoinen sähkökenttä siirtää varauksia paikasta toiseen. Mitä enemmän on vapaita varauksia, ioneja ja elektroneja, sitä suurempi on materiaalin sähkönjohtavuus ja maatutkasignaalin vaimennus. Maatutkasignaali vaimenee syvyyden funktiona ja hienoainespitoisuuden lisääntyessä, kun väliaineen sähkönjohtavuus kasvaa. Maatutkamenetelmä toimii parhaiten alhaisen sähköisen häviön omaavissa materiaaleissa. Kun sähkönjohtavuus on pieni ( $\sigma=0$ ), menetelmän syvyysulottuvuus on suuri, jolloin nähdään syvällä olevia kohteita. Maamateriaalien sähkönjohtavuus on kuitenkin suurempi kuin 0, jolloin signaalin vaimenemista esiintyy sitä enemmän, mitä hienorakeisempi maalaji on kyseessä. Savimineraalit ja esimerkiksi maantiesuola voivat rajoittaa suuresti signaalin syvyysulottuvuutta.

### 2.2.3 Dielektrisyys

Dielektrisyysarvo ( $\epsilon_r$ ) kuvaa väliaineen kykyä polarisoitua eli varautua ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Ulkoisen kentän vaikutuksen loputtua aineen varaustila yleensä palautuu. Jos alkutila ei palaudu, polarisaatio on häviöllistä materiaalin rakenteesta johtuen. Kaikki luonnonmateriaalit ovat dielektrisyysarvon kannalta seosmateriaaleja, jotka koostuvat kiviaineksesta, ilmasta ja vedestä. Vesimolekyyli on luonnonmateriaalien tärkein polarisoituva molekyyli ja sen dielektrisyysarvo on suuri (81), mistä johtuen veden määrällä on ratkaiseva merkitys koko materiaalin dielektrisyysarvoon. Ilman dielektrisyysarvo on 1 ja kiinteään aineen tyyppillisesti 3–5. Tästä johtuen väliaineen dielektrisyysarvon suuruus riippuu pääasiassa vapaan veden määrästä materiaaleissa, jonka seurauksena veden määrän kasvaessa signaalin kulunopeus siinä hidastuu.

Taulukossa 1 on esitetty eri rakennekerrosmateriaalien, pohjamaatyyppejen sekä kalio- ja lioperän dielektrisyysarvoja. Radan rakennekerroksissa käytetyt materiaalit (sepeli, sora, hiekka) omaavat erityisesti kuivana matalan dielektrisyysarvon (4–8). Niiden sähkönjohtavuus on myös matala, joka mahdollistaa hyvän tunkeutumissyvyyden maatutkasignaaliin. Myös kalliossa ja louherakenteissa maatutkasignaali etenee hyvin aallonpituuden ollessa sopiva rakenteen tutkimuksiin. Dielektrisyysarvon merkitystä maatutkasignaalin kulkuun materiaaleissa käsitellään tarkemmin luvuissa 2.3.2 ja 2.3.3.

Taulukko 1. Eri materiaalien tyypillisiä dielektrisyysarvoja Suomessa (Saarenketo 2006).

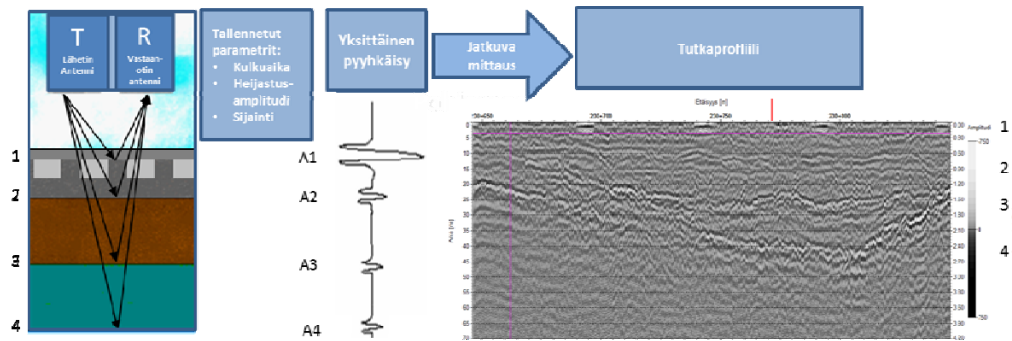
Materiaali	Dielektrisyysarvo
ilma	1
vesi	81
jää	4
kallio (graniitti)	5-7
turve (luonnontilainen)	60
turve (tie- / ratarakenteen alla)	40
savi	25-40
siltti	16-30
silttinen hiekka	7-10
hiekkä	4-6
sora	4-7
moreeni	8-18
ratarakenne keskimäärin (uusi/kuiva)	5
ratarakenne keskimäärin (tavanomainen)	6
ratarakenne keskimäärin (märkä/vanha)	7-8
jäätynyt ratarakenne (tavanomainen)	5
jäätynyt ratarakenne (märkä/vanha)	6
routalevy (uusi)	2-2,5

## 2.3 Maatutkan toimintaperiaate

### 2.3.1 Menetelmäkuvaus

Maatutkamenetelmässä väliaineeseen lähetetään lähetinantennin kautta pulssi, jonka pituus on antennitaajuudesta riippuen alle nanosekunnista kymmeneen nanosekunteihin. Kun aaltopulssi kohtaa muutoksia rakenteissa, sen ominaisuudet muuttuvat, ja osa pulssin energiasta heijastuu sähköisiltä ominaisuuksiltaan poikkeavien materiaalien rajapinnalta. Osa aaltopulssista etenee rajapinnan läpi ja heijastuu seuraavilta rajapinnoilta. Signaalin voimakkuus heikkenee kulkuajan funktiona geometrisen vaimennuksen, signaalin sironnan, heijastusten ja lämpöhäviöiden seurauksena. Maatutkaluotauksessa heijastusten kulku-aika (t) ja amplitudi (A) mitataan vastaanotinantennilla ja amplitudi esitetään kulkuajan funktiona. Kun mittauksia tehdään nopeassa tahdissa peräkkäisissä pisteissä, saadaan tutkittavasta väliaineesta sen rakenteita kuvaava jatkuva luotausprofiili eli tutkakuva. Kuvassa 1 on esitetty maatutkamittauksen toimintaperiaate.





Kuva 1. Maatutkan yksinkertaistettu toimintaperiaate. Amplitudit A1-A4 vastaavat peräkkäisistä rajapinnoista 1-4 vastaanotettuja heijasteita. Rakenneiden kerrosrajat näkyvät vaaleina heijasterajapintoina tutkakuvassa.

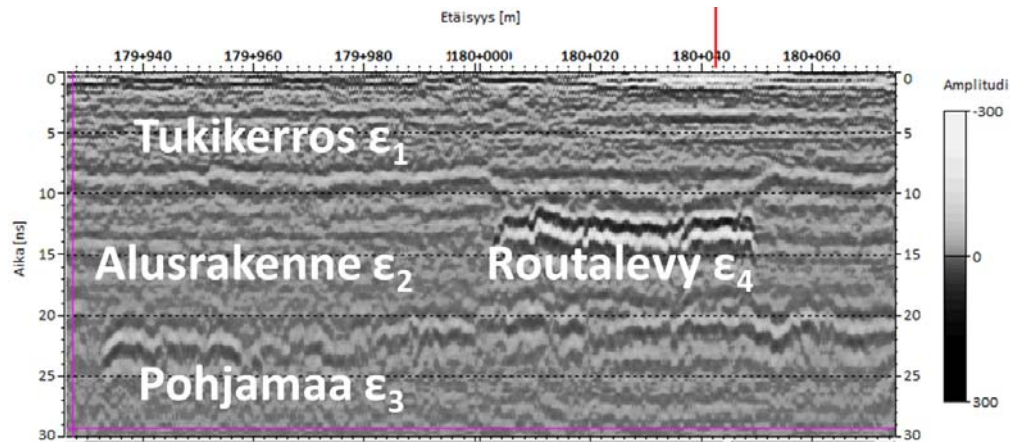
Ratarakenteita mitattaessa heijastuksen aiheuttavia rajapintoja ovat yleensä eri materiaalien rajapinnat, kuten tukikerros-alusrakenne-pohjamaa-rajapinnat, epäjatkuvuuskohdat rakenteissa, esimerkiksi paalu- ja siirtymärakenteet sekä kosteuserot rakenteissa ja pohjamaassa. Maatutkakuvasta voidaan profiilitulkinnan avulla poimia kerrosrajapintojen heijasteet ja laskea kerrospaksuuksia sekä määrittää materiaaliominaisuuksia.

### 2.3.2 Heijastuskerroin ja polariteetti

Jos tutkapulssi etenee väliaineesta 1 väliaineeseen 2 ja väliaineiden dielektrisyysarvot ovat vastaavasti  $\epsilon_1$  ja  $\epsilon_2$ , niin heijastuskertoimeksi R saadaan (Daniels, 1996)

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

Jos heijastuskerroin on negatiivinen, eli  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  kaavassa 1, heijastuksen polariteetti niin sanotusti kääntyy. Kosteuspitoisuuden kasvaessa syvemmälle mentäessä tämä on oletustilanne maaperässä ja ratarakenteissa. Jos  $\epsilon_1$  on suurempi kuin  $\epsilon_2$ , niin rajapinnasta heijastuneen aallon polariteetti pysyy samana kuin siitä etenevän aallon polariteetti. Ratatutkauksissa on kuitenkin yleisenä käytäntönä se, että maan pintaheijaste merkitään positiiviseksi (valkoinen), vaikka heijastuskerroin on todellisuudessa negatiivinen (musta). Vastaavasti merkitään muutkin kerrokset, joissa  $\epsilon_{\text{ylempi}}$  on pienempi kuin  $\epsilon_{\text{alempi}}$ , positiivisiksi heijastuksiksi, ja ne tulee harmaasävyasteikolla esittää siten, että valkoinen heijaste on mustien heijasteiden keskellä (ks. kuva 2  $\epsilon_1 < \epsilon_2$ ). Vastaavasti, jos alemman kerroksen dielektrisyys on pienempi kuin ylemmän, eli esimerkiksi kuvan 2 routalevyrakenteessa  $\epsilon_1 > \epsilon_4$ , on heijaste ns. negatiivinen ja tällöin musta heijaste on valkoisten heijasteiden keskellä. Tarvittaessa antennilta lähtevän ja väliaineessa etenevän aallon polariteetti saadaan helposti muutettua päinvastaisiksi muuttamalla lähetin- ja vastaanotinantennien keskinäistä asemaa tai prosessointivaiheessa kertomalla signaalit kertoimella -1.



Kuva 2. Heijastuksia dielektrisilta ominaisuuksiltaan ( $\epsilon$ ) toisistaan poikkeavien materiaalien rajapinnoilta ilmentävä maatutkaprofiili. Kuvan esimerkissä dielektrisyys (kosteus) kasvaa tukikerroksesta ( $\epsilon_1$ ) alusrakennekerrokseen ( $\epsilon_2$ ) ja alusrakennekerroksesta pohjamaahan ( $\epsilon_3$ ) mentäessä, jolloin heijaste havaitaan positiivisena polariteettina (musta-valkoinen-musta). Sen sijaan routalevyn dielektrisyys ( $\epsilon_4$ ) on pienempi kuin tukikerroksen ( $\epsilon_1$ ), mikä havaitaan negatiivisena polariteettina (valkoinen-musta-valkoinen). Ratasovelluksissa tulosteen harmaasävyasteikko ja heijasteiden polariteetti tulisi olla kuvan mukainen.

### 2.3.3 Syvyysulottuvuus ja erotuskyky

Maatutkalla saavutettavissa oleva syvyysulottuvuus riippuu väliaineen sähköisten ominaisuuksien lisäksi käytetystä antennitaajuudesta ja siten signaalin aallonpituudesta. Väliaineen aiheuttama vaimennus lisääntyy taajuuden kasvaessa, koska väliaineen sähkönjohtavuus samalla kasvaa ja koska tutka-aaltoon vaikuttavien, ja sen vuoksi signaalin energiaa sirottavien, kohteiden määrä lisääntyy aallonpituuden lyhentyessä. Tämä ilmiö voidaan havaita esimerkiksi korkeataajuusantennilla mitatusta tukikerrosheijasteesta. Korkea taajuus ja lyhyt aallonpituus hankaloittavat signaalin etenemistä raidesepeleissä eikä tukikerroksen pohjaheijastetta ole korkeataajuusantennilla aina mahdollista havaita.

Maatutkasignaalin tunkeutumissyvyys pienenee taajuuden kasvaessa, mutta toisaalta erotuskyky samalla paranee. Erotuskyky paranee myös dielektrisyysarvon kasvaessa, jolloin sen kulkuaika kyseisessä kerroksessa pitenee. Erotuskyvyllä tarkoitetaan sitä, kuinka lähellä toisiaan olevat rajapinnat voidaan vielä tunnistaa erillisiksi. Tämä koskee sekä vaakasuunnassa että pystysuunnassa tapahtuvaa havainnointia. Pulssitutkan (ks. luku 2.4.1) syvyysuuntainen erotuskyky ( $h$ ) voidaan laskea kaavasta (Daniels, 1996; Annan, 2003)

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \text{ missä}$$

(2)

$c$	=	valon nopeus tyhjiössä (0,3 m/ns)
$\tau$	=	pulssin pituus [ns]
$\epsilon_r$	=	väliaineen dielektrisyys

Kun tiedetään mitatun rajapinnan syvyys nanosekunteina ja kerroksen dielektrisyys, havaitun rajapinnan syvyys saadaan laskettua kaavalla (Daniels, 1996; Annan, 2003)

$$s = v \cdot t = \frac{0.5 \cdot twt \cdot c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \text{ missä} \quad (3)$$

$twt$  = kaksinkertainen kulkuaika [ns].

Radalla yleisesti käytettävien maatulka-antennien keskitaajuus vaihtelee 100 MHz:sta 3000 MHz:iin käyttösovellusten mukaan. Mitä korkeampi on käytetyn antennin keskitaajuus, sitä matalampi on sen syvyysulottuvuus. Syvyysulottuvuuden kasvaessa antennin syvyyserotellukyky heikkenee. Ratasovelluksissa yleisesti käytetyillä antenneilla maksimi syvyysulottuvuus on noin 4 (400 MHz) - 8 (270 MHz) metriä karkearakeisissa materiaaleissa. 3D-maatutkalla (ks. luku 2.4.2) päästään noin 4 metrin maksimisyytyteen. Syvyysulottuvuuden rajoitukset täytyy ottaa huomioon mittauksia suunniteltaessa. Taulukossa 2 on esitetty ratatutkauksissa yleisesti käytettyjen antennien ominaisuuksia.

*Taulukko 2. Ratatutkimuksissa käytettävien maatulka-antennien ominaisuuksia.*

Antennityyppi 2D / 3D (ks. luku 2.4)	Keskitaajuus [MHz]	Mittausaika [ns]	Syvyysulottuvuus [m]	Sovelluskohteet
2D-pulssitutka	2000-1000	10-20	0,5-1,0	Tukikerrospaksuus, routalevypaikannus
2D-pulssitutka	400-250	80-200	4,0-8,0	Tukikerrospaksuus / -laatu, routalevypaikannus, kokonaisrakennepaksuus / -laatu, pengertäytteen alapinta, kalliopinta
2D-pulssitutka	200-100	200-500	10-20	Paksut penkereet, kalliopinta, turpeikkojen pohja
3D-askeltaajuustutka	3000-100	60-120	1,0-5,0	Rakenteen mittaukset (paksuus, laatu), routaeristeiden paikannus, paalurakenteiden paikannus ja asema. Leikkauspohjan muoto rakenteiden alla.

Rautatietutkimuksiin on olemassa useita käyttökelpoisia antennoja. Yhdysvalloissa on saatu hyviä testituloksia korkeataajuisilla 1–2 GHz ilmastantenneilla, kun taas Euroopassa parhaat tulokset on saatu matalataajuisilla 400–500 MHz:n antennilla. Suomessa kokeiluilla korkeataajuisilla ilmastantenneilla on ollut vaikeaa mitata tukikerroksen paksuutta, mutta antennit ovat soveltuneet hyvin routalevyjen paikantamiseen tukikerroksen alta. Korkeataajuisten antennien lähettämä lyhyen aaltopituuden omaava pulssi siroaa raidesepelistä, jonka raekoko on suurempi kuin 50 mm. Mittauksissa antennit on pidettävä 300 mm ratapölkyn pinnan yläpuolella. Siten ilmassa olevien antennien keskitaajuus on hieman korkeampi verrattuna tilanteeseen, jossa ne olisivat kiinni maanpinnassa. Suomessa on käytetty laajasti myös kolmiulotteista maantutkalaitteistoa (ks. luku 2.4.2), jota käyttämällä voidaan samanaikaisesti mitata useaa rinnakkaista linjaa.

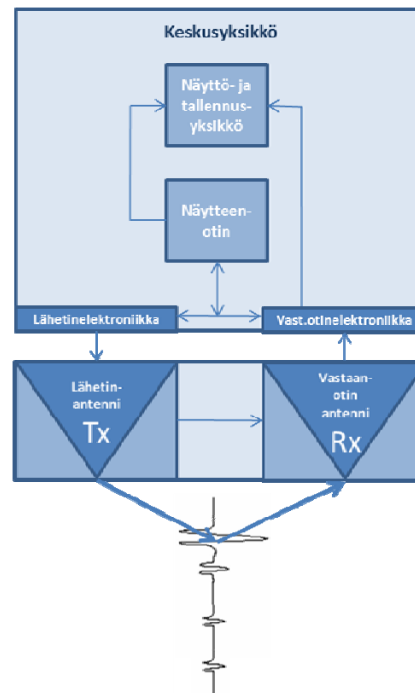
## 2.4 Maantutkalaitteistot

### 2.4.1 2D-pulssitutka

Ratamittauksissa käytettäviä maantutkalaitteistoja on kahdentyyppisiä. Kaksiulotteisilla (2D) pulssitutkalaitteistoilla mitataan korkeintaan kolmea pituussuuntaista linjaa kerrallaan. Kolmiulotteisilla (3D) askeltaajuuslaitteistoilla voidaan samanaikaisesti mitata 3–31 rinnakkaista mittalinjaa. Suurin osa maantutkalaitteistoista toimii aikatasossa pulssitutkaperiaatteella, mutta nykyisin myös taajuustason askeltaajuusmenetelmällä toimivat laitteistot ovat yleistymässä.

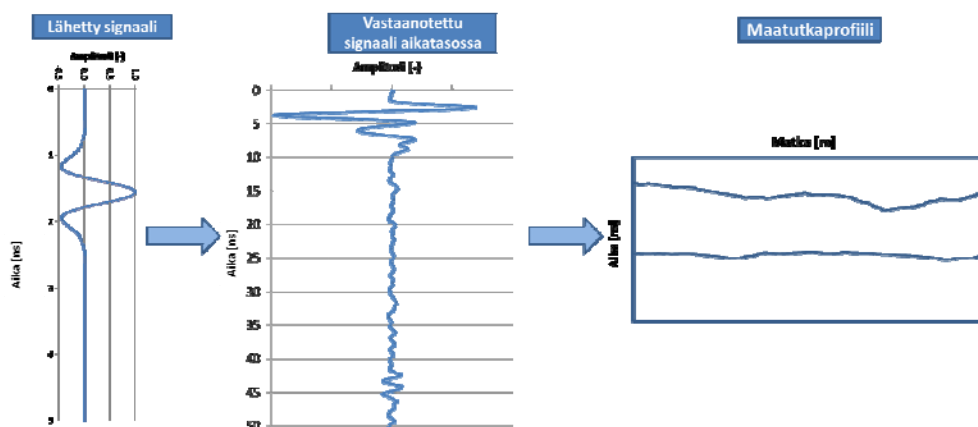
Pulssitutkalaitteisto koostuu useasta eri komponentista (kuva 3). Maantutkalaitteiston tärkein yksikkö on antenni, joka sisältää itse antennin ja antennielektroniikkayksikön, jossa määrätään lähetettävän pulssin voimakkuus ja pituus. Antenni lähettää pulssin väliaineeseen ja kerää rajapinnoista takaisin heijastuneet signaalit. Maantutkan näytteenotin sijaitsee useimmiten keskusyksikössä, jossa heijastuneet signaalit muunnetaan sellaiseen muotoon, että ne voidaan taltioida digitaalisessa muodossa tallentimelle.

Keskusyksikön käyttöliittymän kautta ohjataan koko maantutkayksikön toimintaa. Sen avulla määritetään muun muassa pyyhkäisyjen määrä aika- tai matkayksikköä kohti (pyyhkäisy/sek, pyyhkäisy/m), mittausaika (ns) sekä pyyhkäisyyn digitoitujen näytteiden määrä syvyys suunnassa (esimerkiksi 512, 1024 näytettä/pyyhkäisy), joka määrää syvyysresoluution profiilitarkastelussa. Keskusyksikön avulla määritellään myös datan muoto (esimerkiksi 16, 32 bit), joka määrää muun muassa harmaa- / värisävyjen määrän maantutkaprofiilissa. Lisäksi käyttöliittymän avulla asetetaan mittauksissa mahdollisesti käytettävät signaalin vahvistuskäyrät ja taajuussuodattimet.



Kuva 3. Maatutkalaitteiston komponentit.

2D-pulssitutkalaitteen lähetinantenni lähettää väliaineeseen lyhytkestoisen taajuudeltaan laajakaistaisen sähkömagneettisen pulssin, jonka paluueijaste vastaanotetaan vastaanotinantennilla. Signaali mitataan aikatasossa ja signaalin taajuus-sisällössä antennin keskitaajuus on määräävä, eli korkeita sekä matalia taajuuksia on vähemmän kuin keskitaajuuksia. Pulssitutkan etuna on sen hyvä syvyysulottuvuus, kevyt kalusto ja hyvä maastokelpoisuus. Kuva 4 havainnollistaa pulssitutkan toimintaperiaatetta.



Kuva 4. Pulssitutkan toimintaperiaate.

Yleisimmin ratatutkauksissa Suomessa käytetty maatutkalaitteisto on amerikkalaisen Geophysical Survey Systems Inc:n valmistama SIR-20 / SIR-30 maatutkalaitteisto. Mittausantenneina käytetään normaalisti 400 MHz ja 270 MHz maatutka-antenneja (kuva 5). SIR-20 ja SIR-30 on perustuvat pulssitutkamenetelmään. Toinen ratasovel-luksissa yleisesti käytetty pulssitutka on italialaisen Ingegneria Dei Sistem (IDS) Saferail system, jossa käytetään kolmea 400 MHz antennia. USA:ssa sovelletaan



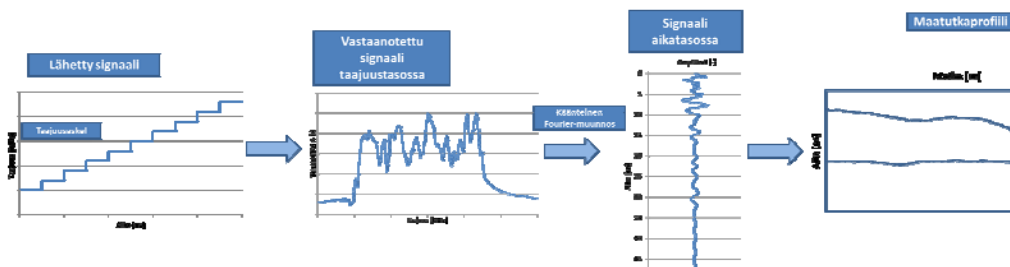
400 MHz maatutka-antennien lisäksi korkeataajuusantenneja (2 GHz) tukikerroksen rakeisuuden arvioimiseen signaalin sironnan perusteella. Korkeataajuusantennin heikkoutena on sen matala syvyysulottuvuus ja häiriöherkkyys ympäröiville sähkömagneettisille kentille.



Kuva 5. Maatutka-antennit kiinnitettyinä ratakuorma-auto TKA-8:n etuosaan. Kaksi 400 MHz:n antennia on kiinnitetty antennitelineeseen raiteen reunoille, pölkkyjen päiden yläpuolelle.

#### 2.4.2 3D-askeltaajuustutka

3D-laitteistot toimivat useimmiten askeltaajuusperiaatteella (kuva 6). Askeltaajuustutka toimii taajuustasossa, missä se lähettää väliaineeseen säännöllistä sinimuotoista signaalia kasvavilla taajuusaskelilla. Tutkalaitteisto mittaa heijastuneen signaalin vaiheen eli muutoksen lähetetyn ja takaisin heijastuneen signaalin välillä sekä amplitudin eri taajuuskaistoilla. Tallennettu aineisto muunnetaan käänteisellä Fourier-muunnoksella taajuustasosta aikatason signaaliksi, jolloin siitä voidaan koostaa maatutkaprofiili. Siitä huolimatta että askeltaajuustutka kerää aineistoa taajuustasossa, lopputuloksena saatava tutkaprofiili vastaa pulssitutkalla saatavaa tulosta.



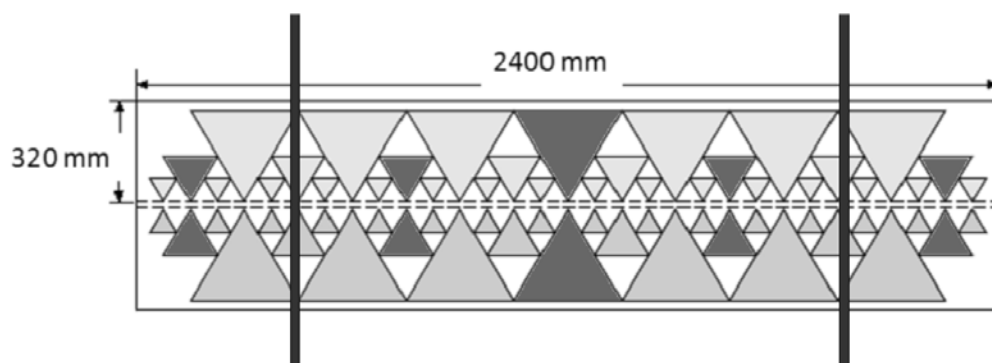
Kuva 6. Askeltaajuustutkan toimintaperiaate.

Erikoistutkimuksissa, kuten paalurakenteiden sijainnin ja aseman paikantamisessa tai kallion leikkauspohjan muodon selvittämisessä, käytetään yleensä 3D-maatutkalaitteistoa. Tavallisimmin radalla käytetty 3D-laitteisto on norjalaisen 3D-Radar AS:n valmistama askeltaajuusmenetelmällä toimiva Geoscope-maatutkalaitteisto 2,4 metriä leveällä maatutka-antennilla. Kuvassa 7 nähdään vanhemman sukupolven 3D-antenni kiinnitettyinä TKA-8:n etuosaan.

3D-antenni on 2,4 metriä leveä, ja se sisältää 31 paria lähetin-vastaanotinantenneja. Antennien sivuetäisyys on 75 mm (kuva 8). Antennit on jaettu kolmeen kokoluokkaan: pienet (16 paria), keskikokoiset (8 paria) ja isot (7 paria). Kuvan 8 rakennekuvasta nähdään erikokoisten antennien sijainti suhteessa ratakiskoihin. 3D-antennilla saadaan tietoa niin raiteen keskeltä kuin myös kiskojen ulkopuolelta pölkkyjen päistä.

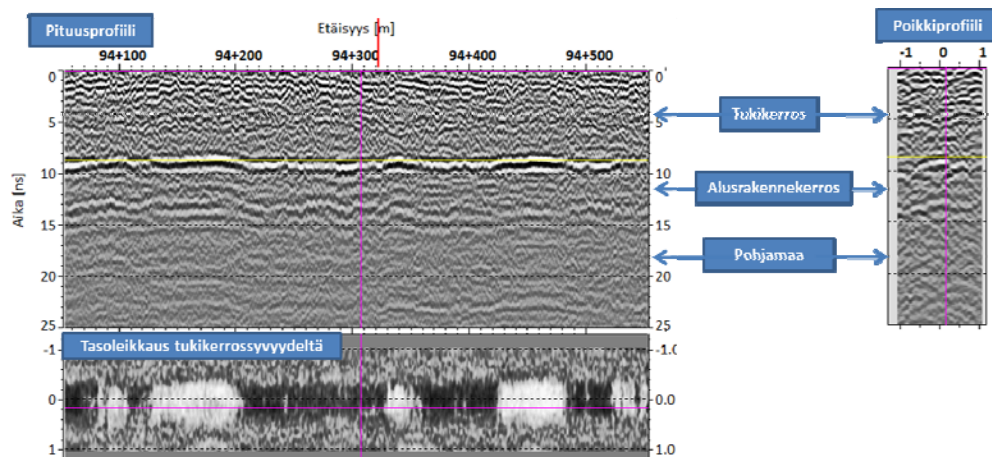


Kuva 7. 3D-antenni kiinnitettynä ratakuorma-auto TKA-8:n etuosaan.



Kuva 8. Teemakuva 3-ulotteisen maatutka-antennin rakenteesta. Mustat viivat osoittavat kiskojen sijainnin suhteessa antenniin.

Askeltaajuustutkan etuna on nopea mittaus usealla kanavalla, mikä mahdollistaa rakenteen pituus- ja poikkileikkauksen samanaikaisen mittauksen. Mittaustuloksia voidaan tarkastella pituusprofiilina, poikkiprofiilina sekä tasokarttana halutulta tarkastelutasolta (kuva 9). Menetelmän hyötynä on myös tarkemmin määritetty taajuusspektri, mikä sallii signaalin laajemman taajuustarkastelun väliaineen laatuanalyysiä edistäen.



Kuva 9. Esimerkki 3-ulotteisen aineiston eri tarkastelutavoista. Vasemmalla yllä pituusprofiili, pituusprofiilin alapuolella tasoleikkaus tukikerroksen alapinnan syvyydeltä ja oikealla poikkileikkaus. Taso- ja poikkileikkaus on koostettu 29 rinnakkaisesta mittalinjasta.

## 2.5 Mittausnopeus

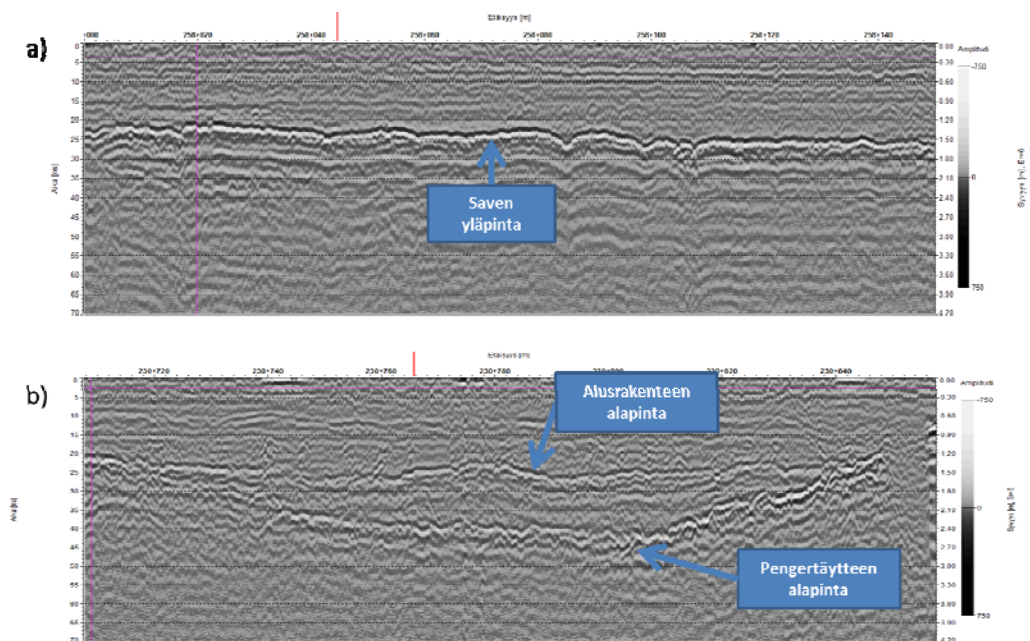
Yleisesti maatutkamittauksia voidaan tehdä lähes liikennöintinopeudella. Maatutkalaitteistojen mittaussnopeus kuitenkin hidastuu kanavien lukumäärän lisääntyessä ja mittaustiheyden kasvaessa joko vertikaali- (näytettä/pyyhkäisy) tai horisontaali-suunnassa (mittausta/metri). Maatutkan mittaussnopeus on maksimissaan 2D-laitteistolla 160 km/h ja minimissään vanhemman sukupolven 3D-laitteistolla 31 aktiivisella kanavalla 10 km/h. Yleisesti maatutkamittauksien keskinopeus on 40 km/h. Uusimman sukupolven 3D-maatutkalaitteistoissa nopeudet ovat kasvaneet, ja niillä 3D-mittaukset voidaan tehdä liikennöintinopeudella. Taulukossa 3 on esitetty maksiminopeuksia erilaisissa ratasovelluksissa. Vähentämällä aktiivisten antennien määrää myös ensimmäisen sukupolven 3D-maatutkaa voidaan käyttää taulukossa 3 esiteillä mittaussnopeuksilla myös tavanomaiseen rakennetutkukseen.

Taulukko 3. Maatutkan maksimimittaussnopeuksia erilaisissa ratasovelluksissa nykyisin käytössä olevilla laitteistoilla.

Maatutkatyyppi	Kanavamäärä	Sovellus	Maksiminopeus [km/h]
2D	2	rakenne-/laatumittaukset	160
3D	3	rakenne-/laatumittaukset	80
3D	7	rakenne-/laatumittaukset	40
3D	31	erikoistutkimus/paaluhattukartoitus	20

## 2.6 Menetelmän rajoitukset ja häiriötekijät

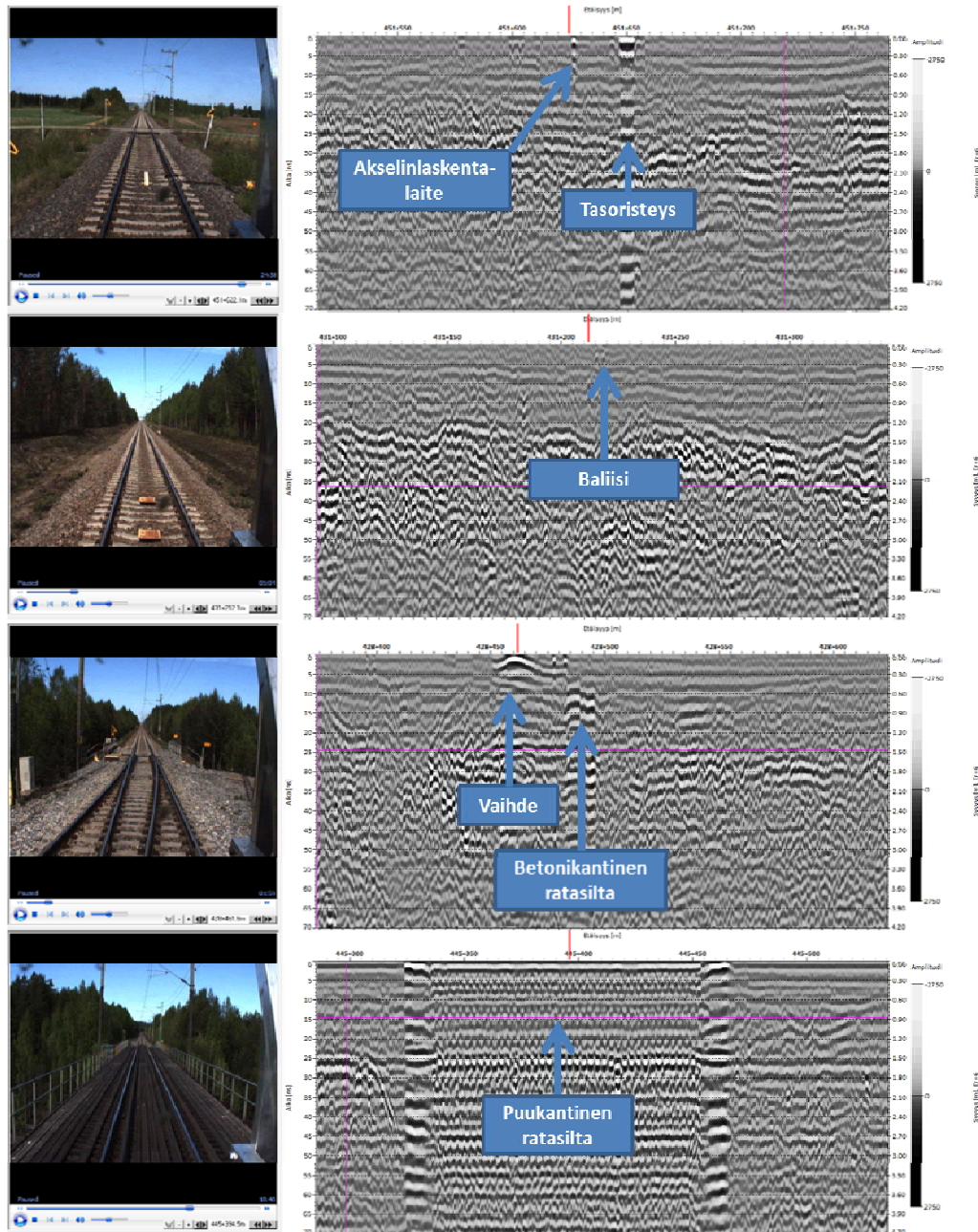
Maatutkamenetelmän rajoitukset perustuvat pääasiassa väliaineen sähkönjohtavuuteen, jonka kasvaessa maatutkasignaali vaimenee. Maatutkasignaalia voimakkaimmin vaimentavia maalajeja ovat hienoainespitoiset pohjamaalajit, kuten savet ja siltit. Savessa ja siltissä maatutkasignaali vaimenee nopeasti, jolloin myös sen syvyysulottuvuus pienenee, eikä hienoaineskerroksen alapuolisia kerroksia yleensä ole mahdollista havaita. Ratarakenteiden alla olevan savi- tai silttikerroksen pinta havaitaan vahvana heijasterajapintana. Karkearakeisissa maissa, kuten hiekka- ja sorakerroksissa, voidaan havaita heijasteita myös pohjamaan tai esimerkiksi pengertäytteen sisäisistä rakenteista. Kuvassa 10a on esitetty maatutka-aineistoa saven päällä sijaitsevasta ratarakenteesta, jolloin saven pintaheijasteen alapuolisista kerroksista ei saada heijasteita. Kuvan 10b esimerkissä nähdään ratarakenne paksun penkereen osuudella, jolloin havaitaan karkearakeisen penkereen pohja noin 2,5 metrin syvyydessä.



Kuva 10. Esimerkki a) signaalin vaimenemisesta savikerroksen pinnan alapuolella ja b) syvällä olevien kerrosrajojen havaitsemisesta karkearakeisessa materiaalissa.

Maatutkasignaali ei myöskään tunkeudu metallin läpi. Rataympäristössä mitattaessa maatutka-aineistoon aiheutuu kiskojen ja ratapölkkyjen lisäksi häiriöitä useista eri lähteistä, kuten silloista, tasoristeyksistä ja vaihteista. Maatutkalla ei nähdä edellä mainittujen rakenteiden läpi. Näiden rakenteiden aiheuttamat heijasteet on hyödyllistä tunnistaa, jotta ne osataan tulkintavaiheessa merkitä aineistoon. Kuvassa 11 on esitetty tyypillisiä muista kuin maarakenteista radalla aiheutuvia maatutkaheijasteita.

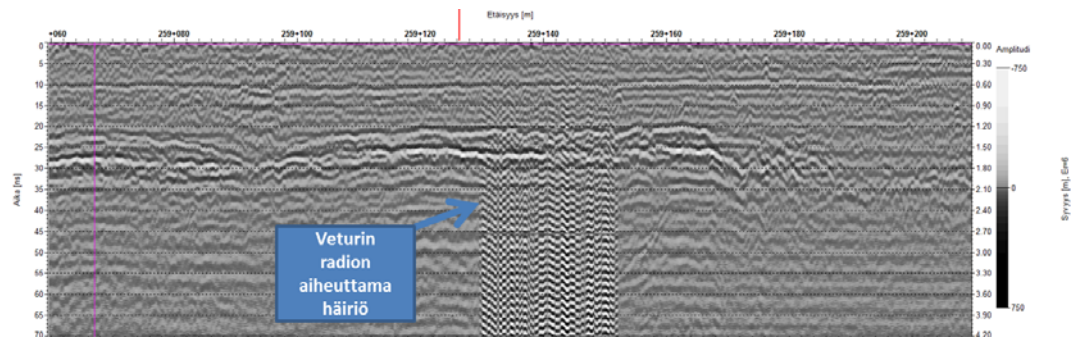




Kuva 11. Tyypillisiä muista kuin rakennekerrosrajapinnoista aiheutuneita heijasteita maatutka-aineistossa.

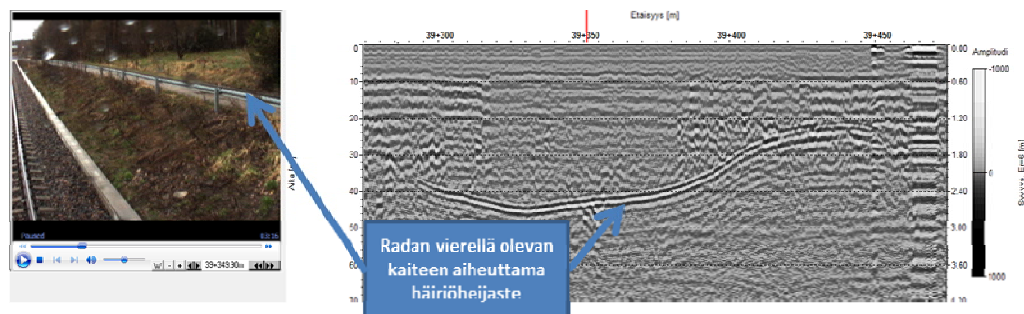
Maatutka-aineistoon aiheutuu häiriötä muistakin kuin maanalaisista tai pintaa lähellä olevista rakenteista. Myös ympäröivät radiolähettimet aiheuttavat maatutkasignaaliin häiriötä, joka voidaan havaita kohinana aineistossa. Kuvassa 12 on esimerkki, jossa ratakuorma-auton radiolähetin on aiheuttanut häiriötä maatutkasignaaliin.





Kuva 12. Ratakuorma-auton radiolähttimen aiheuttama kohinahäiriö maatutka-profiililla.

Samaten radan ympäristössä olevat metalliset objektit, kuten viereisellä raiteella oleva juna ja radan sivulla olevat aidat, voivat aiheuttaa maatutkaprofiiliin ylimääräisen heijasteen, joka on huomioitava aineiston tulkinnassa, jotta heijastetta ei tulkita kerrosrajaksi. Kuvassa 13 on esimerkki maatutkaprofiililla havaittavasta heijasteesta, joka on aiheutunut radan oikealla puolella olevasta metallikaiteesta. Myös lähellä kallioseinää sijaitsevilla linjoilla tulkitsejan tulee ottaa huomioon kallioseinästä mahdollisesti aiheutuva sivuheijaste, joka voi aiheuttaa leikkauspohjaa peittävän heijasteen mitattuun aineistoon.

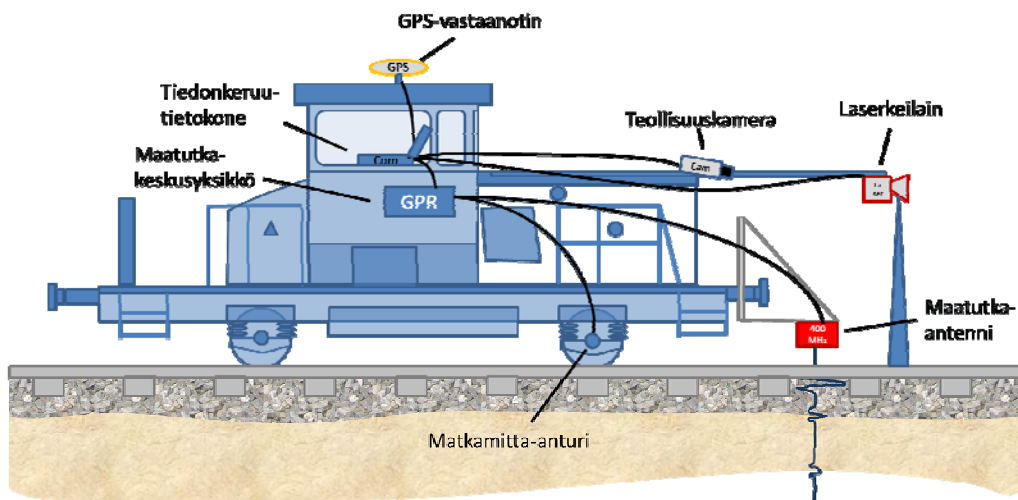


Kuva 13. Radan vierellä olevan metallikaiteen aiheuttama häiriöheijaste maatutka-aineistossa.

Tulkinnan yhteydessä on tärkeää tiedostaa, että myös muut kuin kerrosrajat aiheuttavat heijasteita aineistoon. Häiriölähteiden määrittämisessä on kokemuksen lisäksi suurena apuna ratavideo, josta voidaan tarkastella radan ympäristössä olevia rakenteita.

## 2.7 Mittausten toteutus

Maatutkaluotaukset tehdään yleensä rata-ajoneuvoilla, joihin laitteistot on asennettu joko kiinteästi tai tilapäisillä kiinnityslaitteilla. Suomessa ratatutkaukset tehdään yleisesti ratakuorma-autolla (TKA 7 / 8), johon 2D-maatutka-antennit on asennettu erityisesti ratamittauksiin suunniteltuun antennitelineeseen. Antennit sijoitetaan 300 mm korkeudelle ratapölkyn yläpinnasta radan keskilinjalle ja/tai pölkkyjen päihin. Kuvassa 14 on esitetty tyypillinen ratatutkimuksissa käytetty laitekokoontu 2D-maatutkalaitteistolle.



Kuva 14. Tyypillinen ratatutkimuksissa käytetty mittalaitetekoonpano.

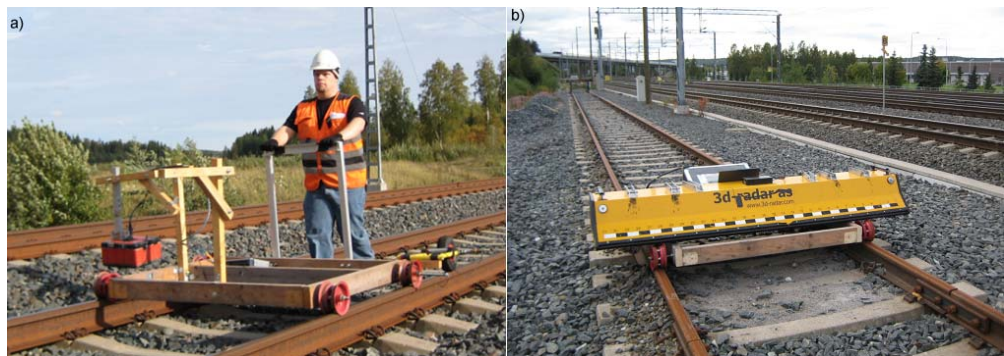
Mittaukset tehdään jatkuvana mittalinjana noin 25 kilometrin jaksoissa. Aloituspisteinä käytetään aina ratakilometripylvästä tai muuta tunnettua kohdetta, jonka sijainti on tiedossa. Mittausjakso myös lopetetaan tiedettyyn pisteeseen. Näin mittaus tulosten sijainti ja pituus voidaan määrittää tarkasti. Mittausten aikana havainnoidaan kilometripylväät ja ne merkitään ajon aikana sähköisesti maatutka-aineistoon. Sillat, tasoristeykset, maa- ja kalliioleikkaukset sekä muut radan objektit voidaan paikantaa ja rekisteröidä mittausten yhteydessä tallennetusta ratavideosta.

3D-maatutkalaitteistolla mitattaessa antenni asetetaan tavallisesti siten, että antennin keskipiste on radan keskilinjalla, jolloin tutkimusleveys on 1,125 metriä keskilinjän molemmin puolin. Leveiden erikoiskohteiden, kuten paalulaattojen tai kalliioleikkaukspohjien, tutkimusten yhteydessä antenni voidaan sijoittaa 2,25 metriä radan keskilinjän molemmin puolin, jolloin mitattavan linjaston leveys on 4,5 metriä. Kuvassa 15 on esitetty 3D-antennin erilaiset sijainnit suhteessa radan keskilinjaan.



Kuva 15. TKA 8:aan asennetun 3D-maatutka-antennin asennusvaihtoehdot suhteessa radan keskilinjaan.

Lyhyitä ratakohteita tai tutkimusjaksoja maatumkattaessa voidaan käyttää myös erityistä ratamittausvaunua tai mittaukset voidaan tehdä jalan. Kuvassa 16 on esitetty kahden eri mittalaitteen mittausvaunujärjestelmät. Mittavaunulla tehtävät mittaukset vaativat kuitenkin raidevarauksen ja helpon pääsyn kohteelle esimerkiksi ratapihalta tai tasoristeysalueelta.



Kuva 16. a) Ratamittausvaunu mittaamassa radan oikeaa reunaa 2D-maatutkalla ja b) koko raiteen leveydeltä 3D-maatutkalla.

Maatutkakalusto voidaan asentaa edellä esitettyjen esimerkkien lisäksi myös useimpiin radalla käytettyihin ajoneuvoihin ja vaunuihin. Mittauskaluston väliaikainen asennus uuteen kulkuneuvoon kestää noin 4-6 tuntia ja valmiiksi asennettuihin telineisiin kalustot saadaan asennettua jopa yhdessä tunnissa. Kuvassa 17 on esitetty esimerkkejä maailmalla käytetyistä mittausajoneuvoista ja -vaunuista.



Kuva 17. Esimerkkejä ratojen maatumkauksissa käytetyistä mittausajoneuvoista eri maissa: a) tuentakone / Ranska, b) mittausveturi / Kreikka, c) mittausvaunu / Ruotsi ja d) ratatyöauto / USA.

Edellä esitettyjen maatumkaluotauslaitteistojen lisäksi mittauskalustoon kuuluvat myös erilaiset datatallentimet sekä datanäytteenottoa ohjaavat anturit, kuten optiset pulssianturit. Pulssianturia käytetään mittauksen tahdistukseen, ja se kiinnitetään pyörän keskiöön magneetin avulla tai vaihtoehtoisesti erityisellä asennusosalla pyörän laakeripesään. Mittaustiheys maatumkauksissa on yleensä 10 tai 5 mittausta metrille, jolloin mittauksien väli on joko 100 tai 200 mm. Kalibroitu matkamittaussanturia käytettäessä etäisyysmittauksen tarkkuudeksi saadaan  $\pm 1$  metri kilometrillä. Mittauskalustoon kuuluu myös 12 V virtalähteet, jotka yleensä ratamittauksissa saavat energian 220 V aggregaatista tai veturin omasta vaihtovirtajärjestelmästä. Paikannusta ohjaavat ja paikkatietoa tallentavat GPS-laitteet ja digitaalivideokalusto sekä useasti myös laserkeilauslaitteisto. Muita maatumkausta tukevia menetelmiä esitellään luvussa 2.9.

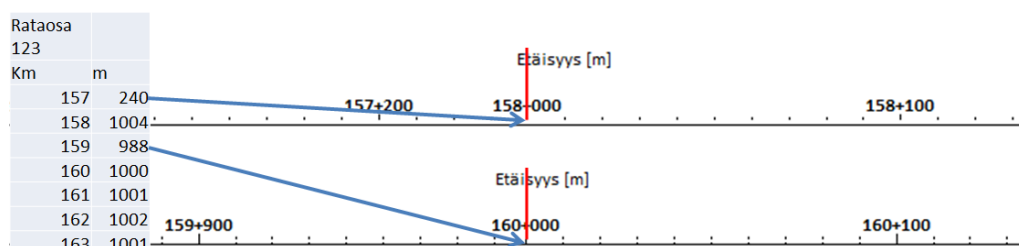
## 2.8 Maatumka-aineiston käsittely ja prosessointi

Maatumka-aineisto vaatii käsittelyä ennen tulkin ja analyysin aloittamista. Mittausten jälkeen kerätty aineisto siirretään mittauslaitteelta työasemalle, jossa aineiston käsittely aloitetaan. Mittausten jälkeen aineisto täytyy ensin esikäsitellä ja sen jälkeen prosessoida. Jos mittauksissa on ajettu laskevien kilometrien suuntaan, esikäsitelyssä mitatun tiedoston suunta käännetään. Yleisesti kaikki mittausaineisto tulkitaan ja analysoidaan kasvavaan kilometrisuuntaan. Jos mittaukset on tehty lyhyissä mittausväleissä, mittatiedostot voidaan myös liittää yhdeksi pitemmäksi tiedostoksi. Yleisenä käytäntönä yhden tiedoston pituudelle on ollut noin 25 ratakilometriä. Tulevaisuudessa tietokoneiden laskentakapasiteetin edelleen kasvaessa ja tiedostonkäsittelyalgoritmien kehittyessä myös pidempien tiedostojen käsittely tulee olemaan mahdollista.



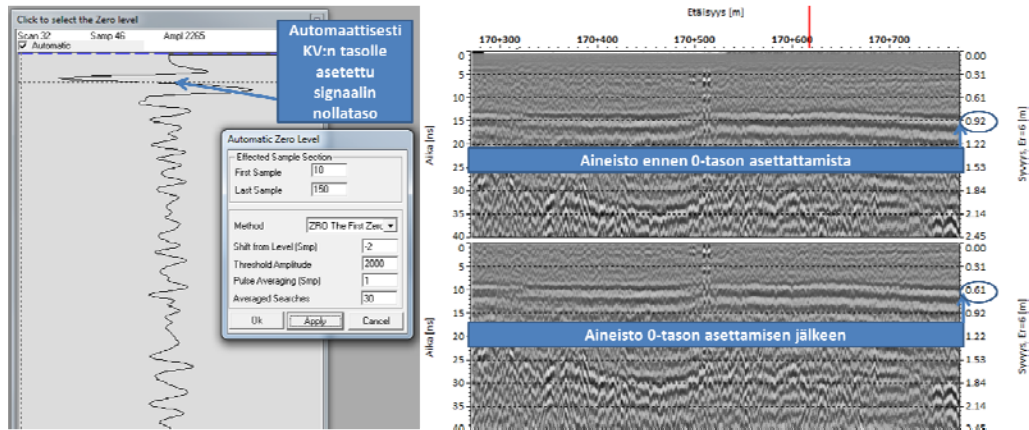
Tiedoston mahdollisen käännön jälkeen skaalataan tiedoston pituus. Mittauksien aikana aiheutunut mahdollinen systemaattinen pituusvirhe voidaan korjata tiedoston käsittelyn yhteydessä. Pituuskaala voidaan muuttaa esimerkiksi GPS:n avulla mitattuun pituuteen tai kilometripituustiedostoista saatuun tarkkaan kilometripituuteen. Myös satunnaisvirheet mittauspituudessa voidaan korjata skaalauksen avulla, jos mittausten aikana kilometripylväät on merkitty aineistoon ja niiden välinen metrilukema on tiedossa. Systemaattista virhettä voi aiheutua väärin kalibroidusta pulsianturista, ja satunnaisvirhettä voi aiheuttaa esimerkiksi mittapyörän luistaminen esimerkiksi kiihdytettäessä.

Tarkan pituusmitan esittämisessä aineiston käsittelyohjelmiston on kyettävä esittämään oikeat kilometripituudet niiden todellisten pituuksien mukaisesti. Rataverkolla kilometripituudet ovat harvoin tasan 1000 metriä. Niiden pituus voi käytännössä vaihdella noin sadasta metristä jopa lähes kahteen kilometriin johtuen rataverkolla tehdyistä oikaisuista ja uusista linjauksista. Tästä johtuen on oleellisen tärkeää tietää tarkat kilometripituudet, jotta mittausaineistosta tuotetut tulokset ovat oikeelliset ratakilometripituuksiin verrattuna. Kuvassa 18 on havainnollistettu tarkan kilometriluvun asettamisen tarpeellisuutta tulosten esittämisessä.



Kuva 18. Esimerkki ratakilometripituuksien esittämisestä pituusmittana. Km 157 on 240 metrin pituinen ja km 159 on 988 metriä pitkä. Aineiston käsittelyssä ratakilometrit jaetaan mittalinjalla niiden todellisen pituuden mukaisesti kilometritietokannan perusteella.

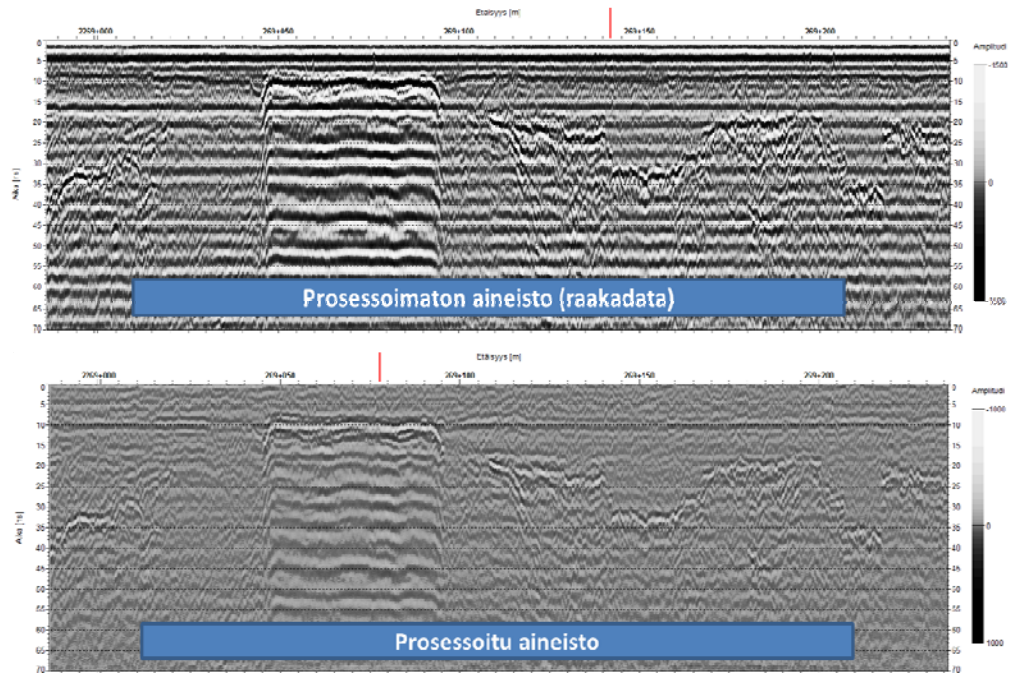
Kun pituuskaala on tasoitettu todelliseen pituuteen, voidaan myös aineiston syvyyskaala määrittää siten, että tulkittavan profiilin ajan nollataso tulee olemaan korkeusviivan (KV) tasolla. Tämä mahdollistaa tulkittujen kerrosrajapintojen laskemisen KV:n tasosta alaspäin. Maatutkaprofiilin primäärisenä pystyskaalana käytetään aina signaalin kuluaikaa nanosekunteina (ns), joka voidaan esittää myös sekundäärisellä pystyakselilla ohjeellisenä syvyytenä metreissä tietyllä dielektrisyydellä laskettuna. Nollatason määrittäminen voidaan tehdä joko automaattiväitteisesti tai manuaalisesti osoittamalla nollatason kohta aineistosta. Kuvassa 19 nähdään esimerkki nollatason kohdistamisesta automaattisella työkalulla RWD-ohjelmistossa. Kuvan perusteella nähdään tukikerrosheijasteen olevan liian syvällä ennen signaalin nollatason asettamista. Nollatason automaattisen kohdistamisen jälkeen tukikerrosheijaste on kyseisessä aineistossa noin KV -550–600 mm tasolla.



Kuva 19. Esimerkki signaalin nollatason kohdistamisesta. Vasemmalla on automaattisesti asetettu nollataso yksittäisen pyyhkäisyn kohdalla. Oikealla ylhäällä on maatulka-profiili ennen nollatason kohdistamista ja oikealla alhaalla nollatason kohdistamisen jälkeen.

Mittauksissa kerätty aineisto sisältää rataympäristöstä, muun muassa kiskoista ja pölkyistä, aiheutuvia häiriöitä (vrt. luku 2.6), jotka voidaan poistaa datasta erilaisilla prosessointialgoritmeilla. Prosessointiasetukset on tärkeä määrittää oikein, jotta oleellinen tieto saadaan esille eikä yliprosessoida datasta todellista tietoa. Prosessointi voidaan tehdä mittausaineistolle siten, että samaa "raakadataa" käsitellään tietokoneen muistissa halutuilla prosessointiparametreilla tai kirjoittamalla raaka-aineistosta uusi prosessoitu tiedosto.

Tiedoston prosessointimenetelmä riippuu yleensä käytetystä ohjelmistosta sekä tiedostojen tallennuskapasiteetista. Ensin mainittu menetelmä säästää tallennustilaa sekä mahdollistaa tarvittaessa prosessointiparametrien muutokset jälkikäteen, mutta se vaatii käytetyltä tietokoneelta laskentakapasiteettia. Jälkimmäisen prosessointitavan käyttö on nykyisin vähenemässä tietokoneiden nopeuksien kasvun myötä. Kuva 20a esittää prosessoimatonta maatulka-aineistoa, joka sisältää muun muassa kiskon aiheuttamia vaakahäiriöitä ja pölkyheijasteista johtuvia lyhyitä hyperbolamuotoisia häiriöheijasteita. Kuvassa 20b häiriöt on poistettu aineistosta prosessointialgoritmeilla. Sopivien prosessointialgoritmien valinta on tärkeää, jotta aineistosta saadaan mahdollisimman selkeästi tulkittavaa.



Kuva 20. Esimerkki maatutka-aineistosta a) ennen prosessointia ja b) prosessoinnin jälkeen. Aineiston prosessointiparametreina on käytetty seuraavia parametreja: 1) nollatason kohdistus, 2) liukuva taustan poisto, 3) signaalin keskiarvoistus ja 4) taajuussuodatus.

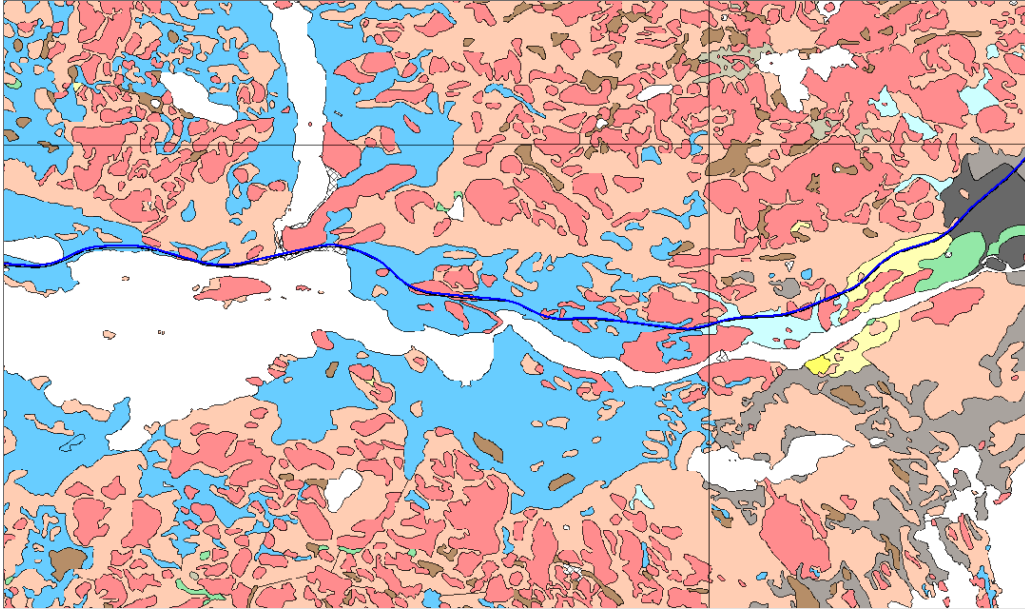
## 2.9 Maatutkauksen yhteydessä tehtävät mittaukset

### 2.9.1 Yleistä

Maatutkamittausten yhteydessä rataympäristöstä kerätään yleensä muitakin maatutkatulkintaa tukevia aineistoja. Menetelminä käytetään poikkeuksetta mittalinjan GPS-koordinaattien keräämistä sekä ratavideon tallennusta mitattavasta kohteesta. Lisätietona voidaan mitata ratarakenteen dimensioita ja radan ympäristön muotoja myös laserkeilaustekniikalla. Mitatun aineiston perusteella kohdetta päästään myös jälkikäteen tarkastelemaan sopivilla ohjelmistoilla ilman kohteelle menemistä.

### 2.9.2 GPS ja ratavideo

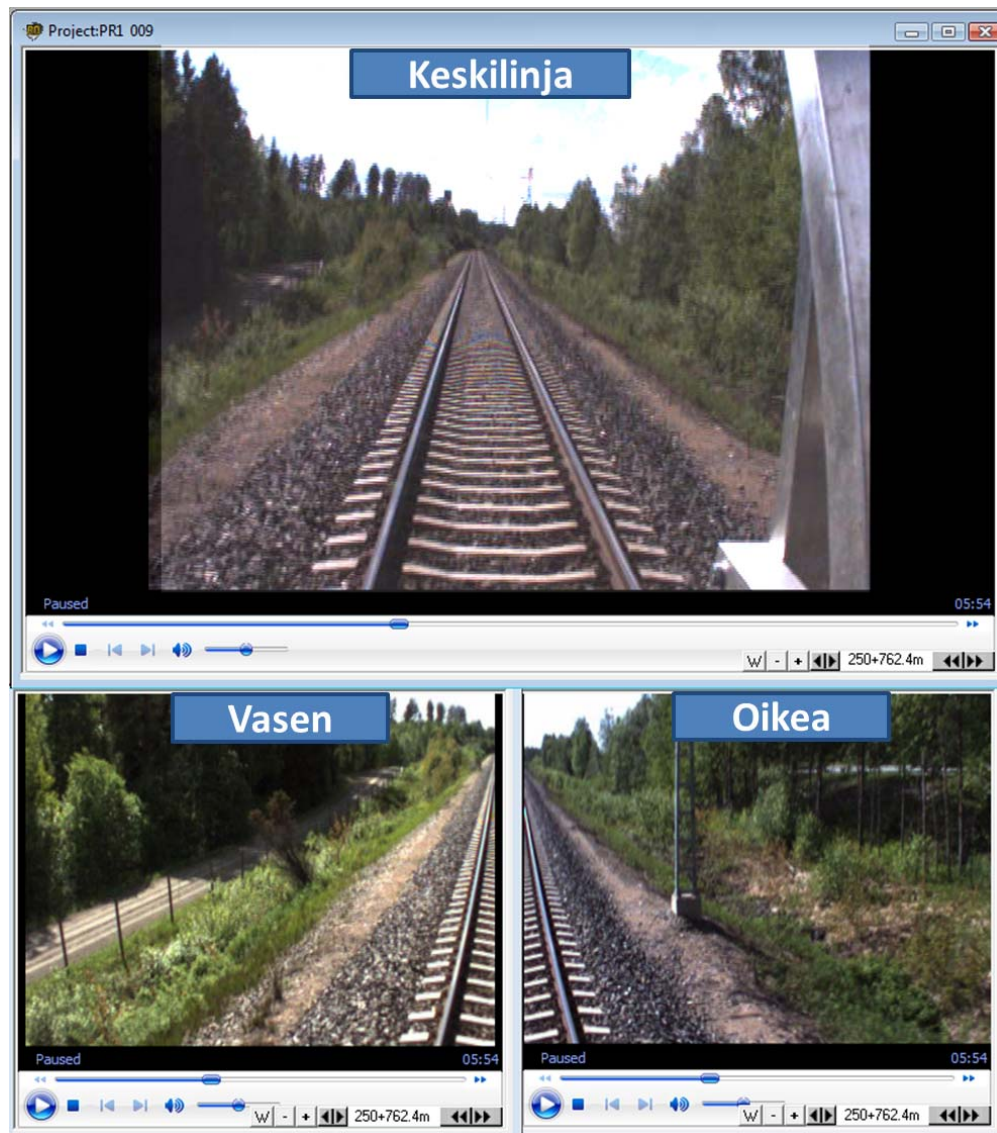
Mittalinjan GPS-koordinaatit tallennetaan maatutkamittausten kanssa samanaikaisesti. Niiden avulla mitattu aineisto saadaan linkitettyä karttakoordinaatistoon ja esitettyä kartalla, jolloin on mahdollista käyttää esimerkiksi maaperäkarttaa referenssi-aineistona (kuva 21). Kartan ja maatutkaluotausaineiston yhdistetyllä tarkastelulla voidaan esimerkiksi arvioida pohjamaan laatua ratalinjalla. Radan GPS-koordinaatteja tallennettaessa voidaan käyttää korkean tarkkuuden omaavia differentiaali-laitteistoja tai vähintään yhden metrin (XY-tasossa) tarkkuuden omaavia GPS-laitteistoja. GPS-aineiston perusteella saadut tulokset on myös mahdollista viedä GIS-ohjelmistoihin esimerkiksi raportointia varten.



Kuva 21. Ratamittauslinja (tummansininen) maaperäkartalla esitettynä.

Uudet digitaalivideointiteknikat mahdollistavat rataympäristön tarkan dokumentoinnin. Visuaalisen tarkastelun avulla pystytään havainnoimaan mitattua rataympäristöä ja paikantamaan ympäristön kohteet, kuten sillat ja tasoristeykset, sekä tarkastelemaan muun muassa kuivatuksen kuntoa. Kuvassa 22 on esitetty ratavideonäkymä kolmen kameran yhdistelmäkuva. Keskikameralla voidaan tarkastella radan keskilinjan aluetta. Sivukameroilla saadaan tarkempaa tietoa vasemman ja oikean reunalueen tilasta.





Kuva 22. Esimerkinäkymä kolmen ratavideokameran näkymästä.

GPS-laitteistolla mitatun koordinaattitiedon ja ratavideon tallentamisessa voidaan käyttää esimerkiksi RD Camlink-ohjelmistoa, joka mahdollistaa tietojen samanaikaisen keräämisen ja nopean yhteenlinkittämisen aineistojen käsittelyvaiheessa sekä myöhemmän tarkastelun yhdistettyjen aineistojen muodossa. Videon ja GPS:n lisäksi ohjelmalla on mahdollista tallentaa myös muiden mittausanturien tuloksia, kuten 2D-poikkileikkauslaserkeilaimen, kiihtyvyysanturin ja lämpökameran aineistoa.

### 2.9.3 Laserkeilaus

Laserkeilaus on mittausmenetelmä, jossa etäisyyden mittaus perustuu laserkeilaimesta lähtevän lasersäteen kulkuajan mittaamiseen laitteesta kohteeseen ja takaisin. Etäisyyden määrittäminen perustuu joko valon kulku aikaan tai vaihe-eroon tai näiden yhdistelmään. Kun lasersäteen lähtökulmat vaaka- ja pystysuunnassa sekä matka tiedetään, saadaan ympäristöstä muodostettua kolmiulotteinen kuva, eli niin sanottu pistepilvi. Pistepilven perusteella voidaan tehdä 3D-mallinnus mitatusta ympäristöstä.

Mittausten tarkkuuteen vaikuttavat muun muassa erilaiset näkyvyyttä heikentävät tekijät, kuten sumu, lumisade ja pöly. Virheellisten tulosten syynä on useimmiten lasersäteiden ennenaikainen poisheijastuminen tai poikkeutuminen esimerkiksi ympäristön tiheään kasvillisuuden vuoksi. Tämä voi olla ongelmana erityisesti kesällä, jolloin korkea kasvillisuus radan reunoilla voi vääristää mitattavaa maanpinnan muotoa.

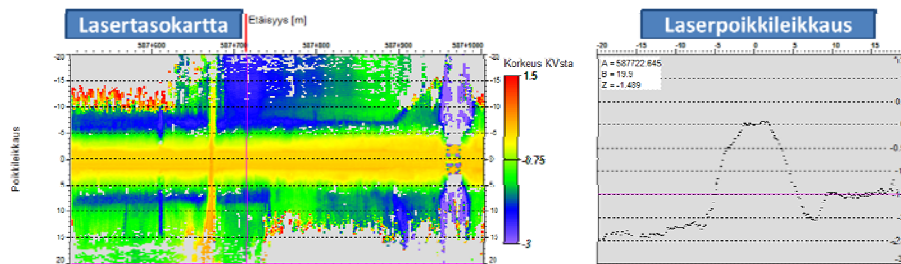
Maatutkaluotausten yhteydessä yleensä käytettävä laserkeilausmenetelmä on niin kutsuttu liikkuva laserkeilauslaitteisto, jossa maalaserkeilain on asennettu liikkuvaan rata-ajoneuvoon. Mittaus perustuu yhteen tai useampaan laserkeilaimeen, tuloksia paikantavaan GNSS-laitteeseen ja kiihtyvyysanturiin tai inertialaitteeseen. Kiihtyvyysanturin tai inertialaitteiston tulosten jälkilaskennan avulla kompensoidaan mitausajoneuvon ajon aikaisen kallistelun vaikutus tuloksena laskettuun pistepilviaineistoon.

Laitteen maksimimittausetäisyys voi vaihdella 20 metristä 50 metriin riippuen laitteen tyypistä. Liikkuva laserkeilainlaitteisto asennetaan mittausveturiin (kuva 23) tai vaunuun noin kolmen metrin korkeuteen korkeusviivan (KV) tasosta, jolloin rata-ympäristö saadaan mitattua noin  $\pm 50$  mm:n korkeusmääritystarkkuudella 20 metrin leveydeltä keskilinjasta molempiin suuntiin.



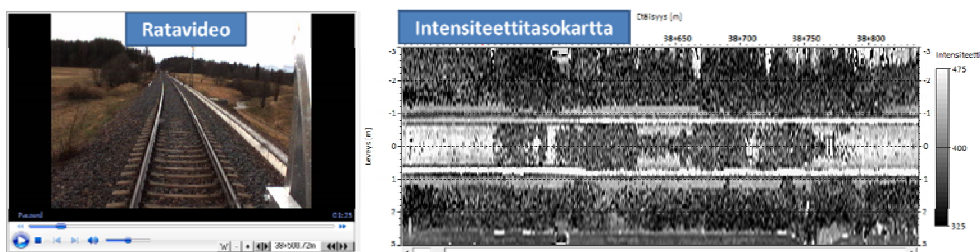
Kuva 23. Sick LMS-151 2D-laserkeilauslaitteisto kiinnitettynä TKA 7:n etuosaan.

Laserkeilaimella mitataan junan liikkuesssa peräkkäisiä poikkileikkauksia, joista saadaan mitattua tietoa esimerkiksi pengerleveydestä, pengerkorkeudesta, ojien etäisyydestä sekä myös aukean tilan ulottumasta ja tukikerroksen pinnan profiilista. Yhdistettynä maatutkatulkintaan laserkeilaustiedosta saadaan tietoa penkereen painumisesta ympäröivän maanpinnan suhteen. Kuvassa 24 on esitetty tulosesimerkki liikkuvalle laserkeilausmenetelmällä mitatusta rataympäristöstä tasokarttaesityksenä sekä poikkileikkauskuvana.



Kuva 24. Laserkeilausaineistosta laskettu värikoodattu maanpinnan tasokartta vasemmalla ja poikkileikkaus kursorin osoittamasta kohdasta oikealla.

Liikuvalla laserkeilaimella voidaan etäisyystiedon lisäksi mitata ja tallentaa jokaiselle heijastuspisteelle paluusignaalin voimakkuutta kuvaava intensiteetti- eli heijastusarvo. Intensiteettiarvot voidaan esittää tasokarttana, jolla voidaan havaita eri sävyillä havaita esimerkiksi mitattavan pinnan kuvioita. Kuvassa 25 on esitetty radalta laserkeilaimella mitattu intensiteettikuva, jossa voidaan nähdä pölkkyjen päällä olevan raidesepelin alue tummana heijasteena vaaleiden kiskoheijasteiden välissä.



Kuva 25. Esimerkki radalta mitatusta laserkeilauksen intensiteettiaineistosta. Ratavideo vasemmalla ja laserkeilausaineistosta laskettu intensiteettitasokartta oikealla.

Laserkeilauksessa voidaan käyttää myös niin kutsuttua mobiiliskanneria, jonka avulla voidaan koostaa tarkka malli mittausympäristöstä. Mittauksissa käytetään 3-ulotteista (3D) tarkkuuslaserlaitteistoa, jonka avulla (kuva 26) on mahdollista mitata tarkka pistepilvimalli (kuva 27) rataympäristöstä esimerkiksi maastomallin laskentaan varten. Kyseisiä laitteita on käytetty lähinnä rajatuissa kohteissa, kuten ratatunneleissa. Laajempien kohteiden mittaukset on tehty yleensä liikuvalla maakeilainlaitteistoilla. Kuvassa 22 on esimerkki 3D-laserkeilainmittauksen pistepilvituloksesta, josta voidaan havaita tarkasti rataympäristön kohteet. 3D-laserkeilaimen etuna on sen tarkkuus ( $\pm 25$  mm todellisesta korkeudesta) ja mittauksen laajuus (200 metriä mittalinjasta molempiin suuntiin). Tarkkojen pistepilvikoordinaattien saamiseksi käytetään kontrollipistemittauksia noin 300–500 metrin välein.





Kuva 26. 3D-Quantum laserkeilausajoneuvo junanvaunuun asennettuna (Geovap, 2012).



Kuva 27. 3D-Quantum laitteistolla mitattu pistepilviaineisto rataympäristöstä. (Geovap, 2012).

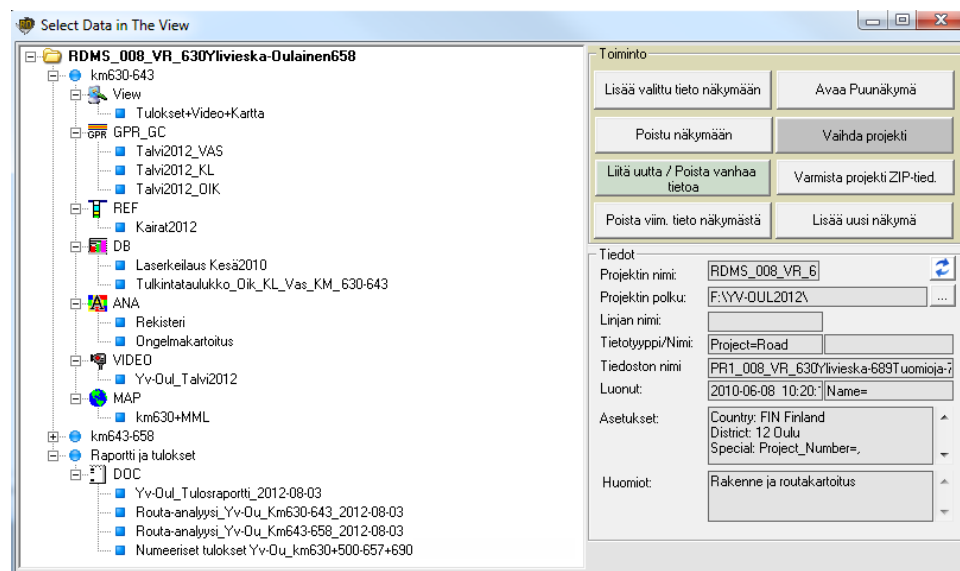
## 2.10 Mittausaineiston käsittelyohjelmistot

Suuren tietomäärän ja rataympäristön erityispiirteiden vuoksi radalla mitatun maatutka-aineiston käsittely, tulkinta ja analyysi vaativat tehokkaan ohjelmiston ja asiaan perehtyneen henkilöstön. Suomen rataverkon maatutkamittausaineiston käsittelyssä yleisesti käytetty ohjelmisto on Railway Doctor (RWD) tai ilman maatutkatulkinta-ominaisuuksia oleva Railway Data Management System (RDMS). Ohjelmistot on suunniteltu erityisesti ratarakenteiden maatutka-aineiston prosessointiin ja tulkinnaan sekä integroituihin kunto- ja vauriotutkimuksiin.

Samassa näkymässä voidaan tulkita ja analysoida mittausaineistoa tai suunnitella radan kunnostustoimenpiteitä käyttäen hyväksi eri lähteistä saatua tutkimustietoa. Yleisesti lähtöaineistona käytetään maatutkadataa, digitaalivideota, GPS-koordinaatteja, raidesepelinäytteenotosta määritettyjä rakeisuuksia sekä routakairauksista saatuja rakennepaksuustietoja.

RWD/RDMS-ohjelmisto mahdollistaa eri ratatietokantojen (esimerkiksi kunnossapito-, rumpu-, tasoristeys- ja routarekisterit) integroinnin maatutka-aineistoon ja niiden yhteistarkastelun radan kuntoanalyysissä. Analyysien tulosten perusteella voidaan tehdä kunnossapitosuunnittelua, tilastollisia laskentoja sekä kustannusarvioita eri kunnostustoimenpiteille.

RWD/RDMS-ohjelmisto käyttää rataosittain jaettua projektiperusteista aineiston käsittelyä. Projekti koostuu rataosakohtaisesta projektipuusta (kuva 28), johon on liitetty eri lähteistä saatua mittautustietoa. Jokainen tietohaara sisältää mitatun aineiston kyseiseltä mittausjaksolta. Eri tietotyypit on esitetty taulukossa 4.

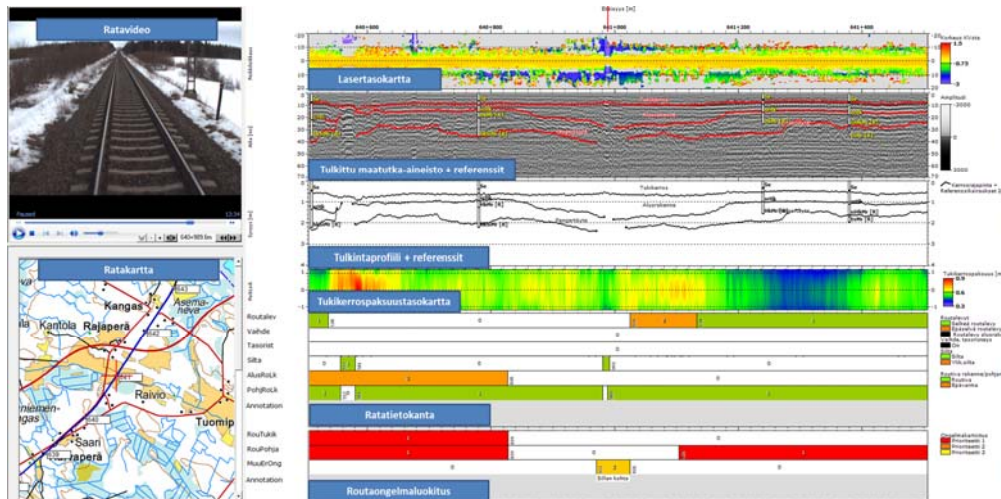


Kuva 28. Esimerkki RWD/RDMS-ohjelmiston projektinkäsittely-ikkunasta. Projektipuusta on vasemmanpuoleisessa ikkunassa ja prosessipainikkeet on sijoitettu oikean puoleiseen ikkunaan.

Taulukko 4. RWD/RDMS-ohjelmiston tietotyyppien selityksiä.

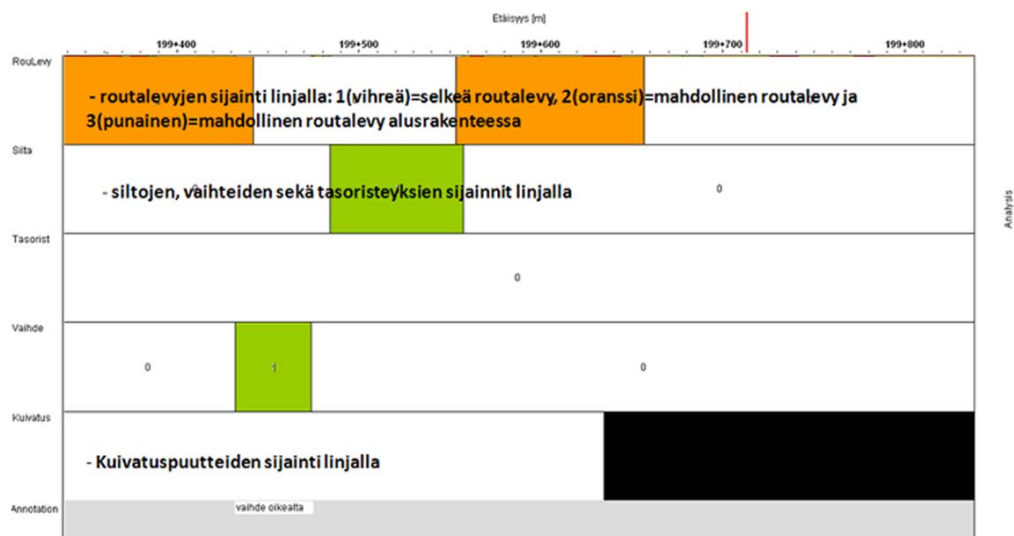
Datatyyppe	Selitys
VIEW	Sisältää tallennetut datanäkymät mittausjaksoilta.
GPR_GC	Maatutkaprofiilit eri kanavilta.
REF	Referenssikairaukset (esim. routatutkimukset).
DB	Eri tietokannat (esim. laserkeilausaineisto ja tulkintataulukot).
ANA	Analyysiaineisto. Esimerkiksi ratatietokanta, jossa mm. siltojen ja tasoristeysten sijainnit sekä eri tulospaametriren luokituksia.
VIDEO / PIC	Ratavideo / kuvajono
MAP	Mittauskohteen kartat.
DOC	Dokumentit, jotka avautuvat esivalitussa sovelluksessa. Esimerkiksi projektiraportti ja taulukot.

Projektipuussa näkyvät tallennetut näkymät (View) voidaan avata kaksoisnapsauttamalla näkymän nimeä. Valitsemalla valmis tallennettu näkymä, avautuvat tiettyyn esitystapaan tallennetut tulokset näyttöön kyseiseltä rataosuudelta. Datanäkymään on mahdollista avata haluttuja aineistoja myös yksitellen, jolloin voidaan päätyä esimerkiksi kuvan 29 mukaiseen näkymään. Eri aineistojen havainnointi näytöllä samanaikaisesti tarjoaa hyvät edellytykset ratarakenteen kokonaisvaltaiselle syysseuraus-tarkastelulle. Ohjelmistosta on saatavilla ilmainen aineiston katseluohjelma RDMS Viewer, joka on ladattavissa osoitteesta: [www.roadscanners.com](http://www.roadscanners.com).



Kuva 29. Esimerkinäkymä RWD/RDMS-ohjelmiston käyttöliittymästä. Ylimpänä oikealla on laserkeilausaineiston värikoodattu tasokartta. Seuraavat kaksi ikkunaa sisältävät maatutka-aineiston ja -tulkinna sekä referenssikairauksen kerrospaksuustiedot. Maatutkaprofiilien alla on värikoodattu tasokartta tukikerrospaksuudesta. Tasokartan alla on esitetty ratatietokanta (ks. seuraava luku). Alimpana on routaongelma-analyysin tulospalkki, jossa on paikannettu ja luokiteltu routaongelmien sijainnit ja niiden aiheuttajat. Digitaalivideo sekä kartta mittalinjasta on esitetty profiilitietojen vasemmalla puolella.

Esitetyn mittausaineiston lisäksi mittauskohteen radan pysyvät rakenteet, kuten sil-  
lat, vaihteet ja tasoristeykset, on mahdollista havainnoida digitaalivideolta ja merkitä  
ne RWD:n ratatietokantaan. Myös muut tiedot, kuten mittausaineistosta tulkitut rou-  
talevyjen sijainnit, kunnossapitäjien kokoamat routaongelmapaikat, rumpu- tai silta-  
rekisterien tiedot tai vaikkapa raidegeometriatiedot voidaan helposti siirtää tietokan-  
taan ja valita näytettäväksi samassa näkymässä maatutkauksen tulkintojen tuottami-  
en rakennetietojen kanssa. Rata-analyysitiedostot voivat sisältää numeerista infor-  
maatiota ja kommentteja. Kuvassa 30 on nähtävissä esimerkki ratatietokannassa esi-  
tettävistä tiedoista.



Kuva 30. Esimerkki ratatietokannassa esitettävistä tiedoista.

## 3 Rakennerajojen tutkimukset

### 3.1 Rakennerajatutkimusten tarve

Rakennekerrosten kokonaispaksuuden tunteminen on olemassa olevien ratojen uudistamis- ja parantamissuunnittelussa yksi keskeisimmistä lähtötiedoista. Pistemäisesti rakennekerrosten paksuuksia voidaan arvioida kierrekairauksilla, mutta maatutkaus mahdollistaa ratalinjalla jatkuvan tiedon (Ratahallintokeskus 2002a). Maatutkaluotauksella saatujen rakennepaksuustulosten perusteella on myös mahdollista yhdistää kohteessa aiemmin tehdyt pistemäiset rakennetutkimukset jatkuvaksi tiedoksi. Maatutkalla pystytään arvioimaan kokonaisrakennepaksuuden lisäksi rakennekerrosrajat ja siten erikseen tukikerroksen ja alusrakennekerrosten paksuudet.

Avainroolissa rakennekerrosrajojen määrittely on routamitoitukseen (Ratahallintokeskus 2008) liittyvässä routasuojauksen parantamistarpeen arvioinnissa tarkasteltaessa routimattomien materiaalien kokonaispaksuutta. Toisaalta tieto hyvin ohuesta rakennepaksuudesta antaa aiheen tarkastella rakenteen kuormituskestävyyden riittämättömyyttä. Jatkuva rakennepaksuustieto mahdollistaa myös radan jäykkyyden epäjatkuvuuskohtina ilmenevien rakennepaksuuden äkillisten muutoskohtien paikantamisen, routalevyjen paikantamisen sekä leikkauspohjan tutkimukset.

Jatkuva rakennepaksuustieto soveltuu myös ratapenkereen ja pohjamaan painumien arviointiin. Kun painumaa tai penkereen leviämistä korjataan tukikerrosta täydentämällä, suuremman tukikerrospaksuuden alue todennäköisimmin indikoi runsasta painumista. Moniantennitekniikan myötä useammalla tutkauslinjalla voidaan tuottaa mahdollisia painumia paljastava tukikerrospaksuuden tai kokonaisrakennepaksuuden profiili myös radan poikittaissuunnassa.

Tutkimuksellisessa näkökulmassa rakennekerrosten paksuustiedon avulla voidaan tarkastella tilastollisesti kerrospaksuuksien roolia rakenteen kuntoa kuvaavien eri tekijöiden, esimerkiksi raidesepelin hienonemisen tai raidegeometrian laadun, määrittelijöinä. Maatutkaa on mielekästä hyödyntää myös kairaututkimusohjelman teossa. Jatkuvan maatutkatulkintaprofiilin perusteella jatko- ja lisätutkimusten määrä voidaan optimoida ja ne voidaan kohdistaa oleellisiin paikkoihin, joissa rakenteiden tai pohjamaan ominaisuudet muuttuvat.

Rakennerajojen määrittäminen on tarpeen myös uusien ratojen rakennustöiden, masanvaihtotöiden, sepelinpuhdistuksen tai -vaihdon sekä muiden syvyysulottuvuuden tarkastelua edellyttävien töiden laadunvalvonnassa (Ratahallintokeskus 2006), jota käsitellään myöhemmin luvussa 3.3. Näissä tapauksissa maatutkaus on ratalinjalta jatkuvaa tietoa tuottavana ylivertaisen tehokas menetelmä.



## 3.2 Rakennerajojen tulkinta

### 3.2.1 Tulkinnan perusteet

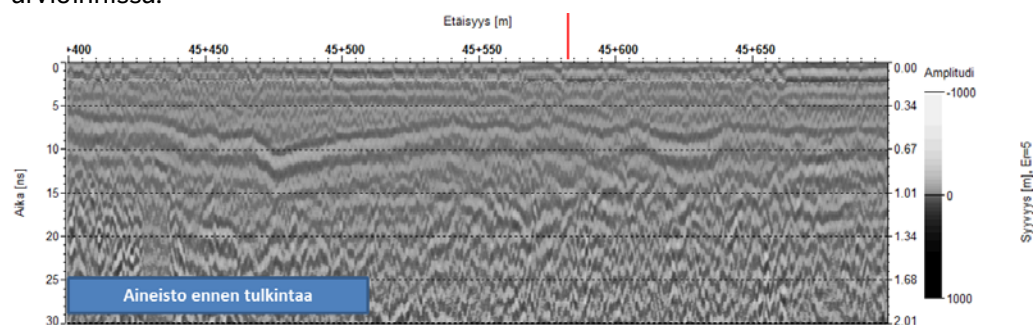
Maatutkaprofiilin tulkinnan avulla voidaan määrittää rakennerajojen syvyys jatkuvana profiilina. Mittaustulosten tulkinta perustuu profiilin rajapintaheijasteiden poimintaan ja niiden seuraamiseen linjalla. Heijasteita aiheuttavia rakennerajapintoja ovat materiaalien vaihtumiskohdat esimerkiksi tukikerroksen ja alusrakenteen välillä sekä alusrakenteen ja pohjamaan rajalla. Rajapinta aiheutuu materiaalien fysikaalisten parametrien muuttumisesta edellä (luvut 2.2 ja 2.3) kuvatun mukaisesti.

Rakennekerrosrajojen tulkinnan tukena ja maalajimäärittämisessä käytetään routakairaustietoja. Maatutkatulkinta tehdään tavallisesti kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan alustava tulkinta, jossa poimitaan aineistosta tukikerroksen alapinta ja routimattoman alusrakenteen alapinta sekä tehdään referenssikairausohjelma epäselvistä kohdista. Toisessa vaiheessa tehdään lopullinen tulkinta referenssikairauksia apuna käyttäen. Jos käytössä on aiemmin tehtyjä referenssikairauksia, voidaan lopulliset tulkinnat tehdä yhdessä vaiheessa. Tarvittavien referenssikairauksien määrä on yleensä noin 2 kairasta kilometrille.

Jos referenssikairauksia ei ole käytettävissä ja kerrospaksuudet halutaan määrittää mahdollisimman tarkasti, mittaukset tulee tehdä maksimiroudan aikaan rakenteiden ollessa jäässä ja materiaalin sisäisen dielektrisyysarvon vaihtelun ollessa mahdollisimman pientä. Tällöin saadaan tietoa myös routarajan syvyydestä.

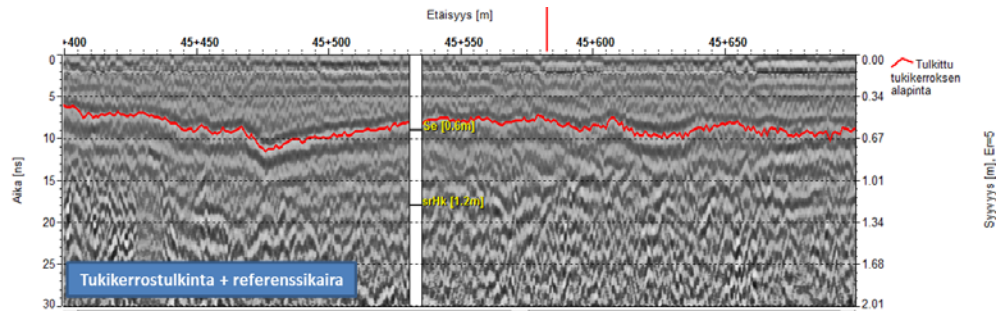
### 3.2.2 Tukikerros

Tulkinnan ensimmäisessä vaiheessa maatutka-aineisto tulostetaan näytölle sopivilla näyttöasetuksilla, jolloin rakennerajapinnat näkyvät selkeinä heijasteina. Kuvassa 31 on esimerkkinä 400 MHz maatutka-aineisto ennen tukikerrostulkinnan aloittamista. Vasemmalla pystyakselilla nähdään aikaskaala ja oikealle voidaan tulostaa ohjeellinen syvyyskaala tietyllä dielektrisyysvakiolla laskettuna (kaava 3, esimerkiksi talvimittauksissa  $\epsilon_r=5$ , kesällä  $\epsilon_r=7$ ). Syvyyskaala auttaa heijasteen oikean syvyytason arvioinnissa.



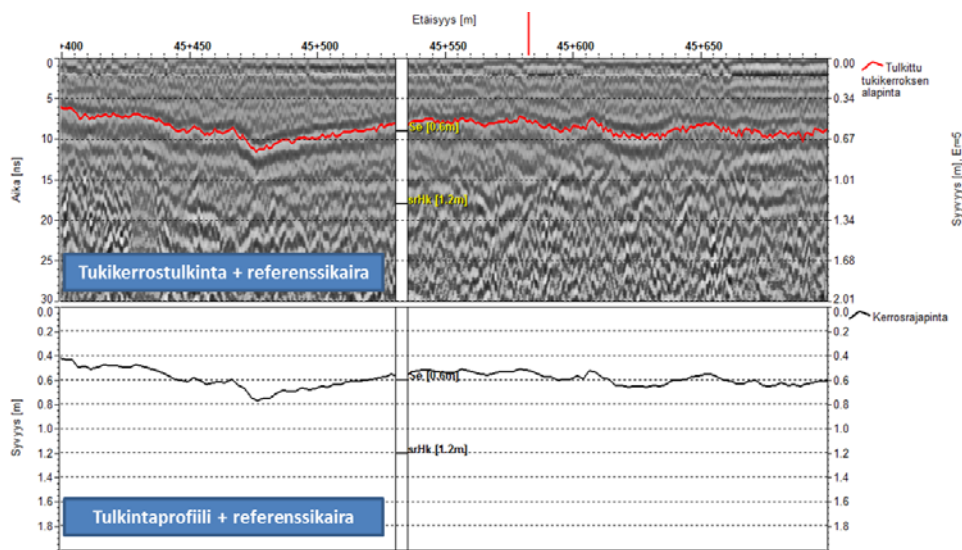
Kuva 31. Maatutkaprofiili tulostetaan näytölle sopivilla asetuksilla.

Tukikerroksen paksuus voidaan määrittää jatkuvana kerrosrajana maatutkaprofiilista, jolloin tuloksesta saadaan tietoa tukikerrospaksuuden vaihtelusta radan pituussuunnassa. Kuvan 32 profiilikuvassa on tulkittu tukikerrospaksuus. Tulkinnan referenssinä on käytetty routatutkimustietoa, josta nähdään tutkimuspisteessä tukikerrospaksuuden olevan 0,6 metriä Maatutka-aineistossa tukikerroksen alapinnan heijaste voidaan havaita samalla syvyydellä.



Kuva 32. Maatutkaprofiilista poimitaan rajapintaheijasteet tulkintatyökalun avulla ja tulkituille kerroksille määritetään dielektrisyysarvo esimerkiksi routakairaustietoa hyväksi käyttäen.

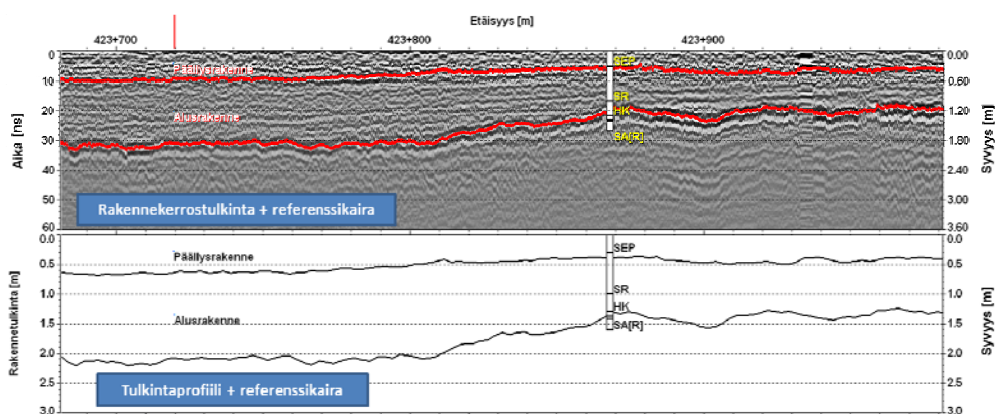
Tulkinnan jälkeen voidaan tehdä kairausohjelma mahdollisille epäselviksi jääneille jaksoille ja esitulkinta voidaan muuntaa aikaskaalasta syvyyskaalaan aika-syvyysmuunnoksen avulla. Tulkinnasta voidaan nyt tulostaa kerrosrajapintojen syvyyksiin perustuva jatkuva profiili (kuva 33), jossa myös referenssikairatiedot voidaan esittää samalla linjalla. Pistetiedon lisäksi maatutkan jatkuvan profiilitulkinnan perusteella nähdään tukikerrospaksuuden vaihtelevan linjalla 0,45-0,75 metrin välillä.



Kuva 33. Tulkinnoille tehdään dielektrisyysarvoon perustuva aika-syvyysmuunnos, jolloin lasketaan kerrosten todelliset paksuudet. Tulkintaprofiili voidaan tulostaa näkymään yhdessä routakairaustietojen kanssa.

### 3.2.3 Alusrakenteen ja pohjamaan rajapinta

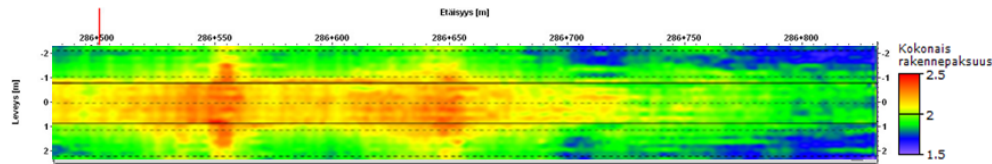
Alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnan syvyyden määrittämisessä menetellään samoin kuin edellisissä esimerkeissä tukikerroksen tapauksessa. Kuvassa 30 on esimerkki alusrakenteen alapinnan määrittämisestä. Alusrakenteen ja pohjamaan rajapinta näkyy heijasterajapintana maatutkaprofiilissa, joka on tulkittu heijasteen maksimiampplitudin kohdalle. Paalulla 423+867 sijaitsevan routakairatiedon perusteella alusrakenteen alapinta on 1,4 metrin syvyydellä ja alusrakenteen alapuolinen pohjamaa on savea. Profiilista nähdään kokonaisrakennepaksuuden olevan yli kaksi metriä näkymän alkuosassa ja ohenevan noin 1,2 metrin syvyyteen näkymä-alueen loppuosuudella.



Kuva 34. Esimerkki alusrakenteen ja pohjamaan välisen rajapinnan määrittämisestä maatutka-aineistosta.

Tulkinnan perusteella saatavaa jatkuvaa rakennepaksuustietoa voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi määrittäessä routimattomien kerrosten paksuutta routasuojasuunnittelun lähtötietona. Erityisen hyvin maatutka soveltuu hienorakeisen pohjamaan päällä olevien rakennekerrosten paksuuden määrittämiseen. Karkearakeisen pohjamaan kohdalla alusrakenteen ja pohjamaan rajapinta ei ole aina selkeästi havaittavissa materiaalien pienen dielektrisyyskontrastin vuoksi.

Jos tutkimuskohteessa on mitattu useampi vierekkäinen mittalinja, on mahdollista tarkastella rakennekerrospaksuuksia pituussuunnan lisäksi myös poikkisuunnassa. Tulokset voidaan visualisoida kuvan 35 mukaisena värikoodattuna tasokarttana, jossa kerrospaksuuden muutokset linjan pituus- ja poikkisuunnassa ilmenevät värien muutoksina valitun väriskaalan mukaisesti. Kuvassa 35 esitetyn tasokartan perusteella voidaan tarkastella esimerkiksi painumakohteiden sijaintia ja laajuutta ratalinjalla. Tasokuva on koostettu 31 rinnakkaisen mittalinjan tulkinnoista.



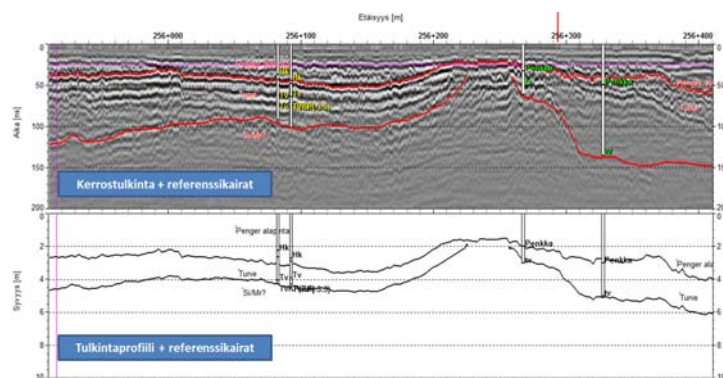
Kuva 35. Kokonaisrakennepaksuuden värikoodattu tasokarttaesitys. Km-välillä 286+470 - 286+730 nähdään (punainen alue) ratarakenteiden painumista indikoivaa kokonaisrakennepaksuuden kasvua.

### 3.2.4 Pengertäytteen ja pohjamaan rajapinta

Maanvaraisten ratapenkereiden paksuus ja muoto sekä penkereen alla olevan pohjamaan ominaisuudet on tärkeää selvittää esimerkiksi akselipainojen noston suunnittelun yhteydessä tehtäviin stabiliteettilaskelmiin. Pengertutkimuksissa maatulkaa on käytetty lähinnä penkereen alapinnan tason selvittämisessä pehmeiden pohjamaiden ja turvepehmeikköjen alueilla. Pohjamaan teknisten ominaisuuksien selvittämistä varten tarvitaan tarkempia pohjatutkimuksia, kuten siipikairauksia, joiden kohdistamista olennaisiin kohteisiin ratalinjalla voidaan ohjelmoida maatulkaista saatavien tulosten perusteella.

Pengertäytteen alapinnan määrittämisessä maatulka-aineistosta voidaan tulkita kerroksen rajapinta, jos täyttömateriaali ei ole liian hienoaainespitoista ja signaalia vaihtelevaa. Pengertäytteen alapinnan määrittämisessä käytetään yleensä matalataajuisia (100–270 MHz) antennia. Jos penkereen alapuolinen materiaali on karkearakista pohjamaata tai turvetta, voidaan myös kyseisen karkearakaisen materiaalin tai turpeen alapinnan taso kartoittaa mittaussyvyyden sen sallissa.

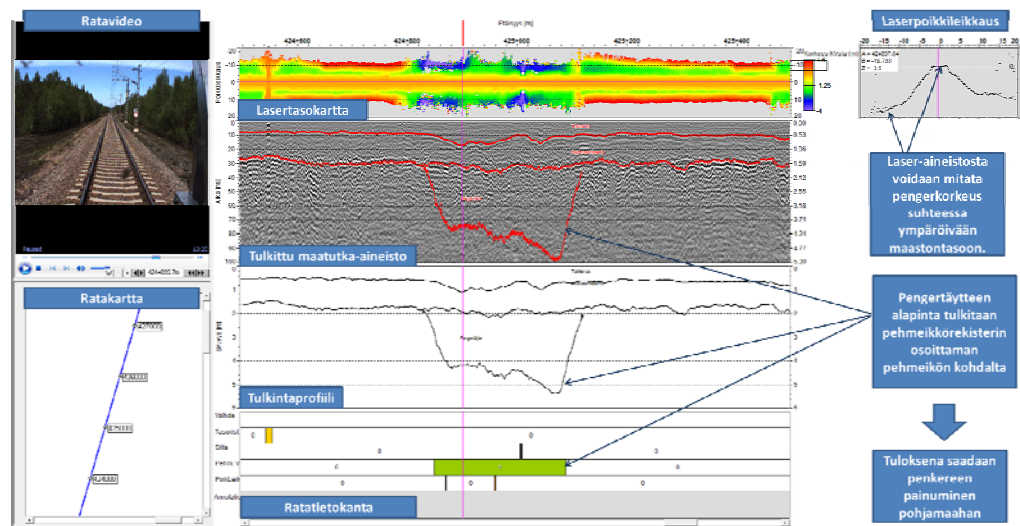
Ratarakenteiden alapuolisen turvekerroksen paksuuden tarkkaan määrittämiseen maatulalla tarvitaan turvekerroksen läpäiseviä referenssikairauksia, jotta turpeen dielektrisyys voidaan määrittää. Turpeen vesipitoisuus voi vaihdella kohteittain, mikä vaikuttaa sen dielektrisyteen ja myös syvyytlaskennan tulokseen. Turpeikon sijainti kuitenkin havaitaan yleensä selkeästi maatulka-profiilista, kun käytössä on matalataajuisen maatulka-antenni (100–270 MHz). Kuvassa 36 on 150 MHz antennin profiili, johon on tulkittu penkereen alapinta sekä penkereen alapuolisen turvekerroksen paksuus. Tulkinnaissa on käytetty apuna referenssikairauksia.



Kuva 36. Esimerkki pengertäytteen alapinnan ja turvekerroksen rajapintojen tulkinnasta.

Penkereen alapinnan tulkinnoissa voidaan käyttää myös integroitua mittausaineistotulkintaa, jolloin maatulka-aineiston kanssa on mahdollista yhdistetysti tarkastella myös muuta aineistoa, kuten laserkeilausdataa. Laseraineiston perusteella voidaan laskea ratapengertä ympäröivän maanpinnan korkeutta radan korkeusviivasta. Tulkin perusteella voidaan tarkastella ratapenkereen paksuutta ja painumista ympäristön maanpinnan tasoon nähden.

Kuvassa 37 on esimerkkinäkymä aineiston analyysistä, jossa samassa näkymässä voidaan analysoida laserkeilauksista ja maatulka-aineistosta saatuja aineistoja yhdessä ratavideon ja ratakartan kanssa. Laserkeilaustulosten perusteella voidaan havaita myös mahdollisten vastapenkereiden olemassaolo sekä paikantaa rataobjektien, kuten siltojen, rumpujen ja tasoristeysten, sijainti. Yhdistetyn aineiston läpikäynnin perusteella on mahdollista kartoittaa myös aiemmin rekisteröimättömiä ”pimeitä” pehmeiköitä.



Kuva 37. Esimerkki pengerkohdeiden tulkinnasta maatulka- ja laserkeilausaineiston perusteella

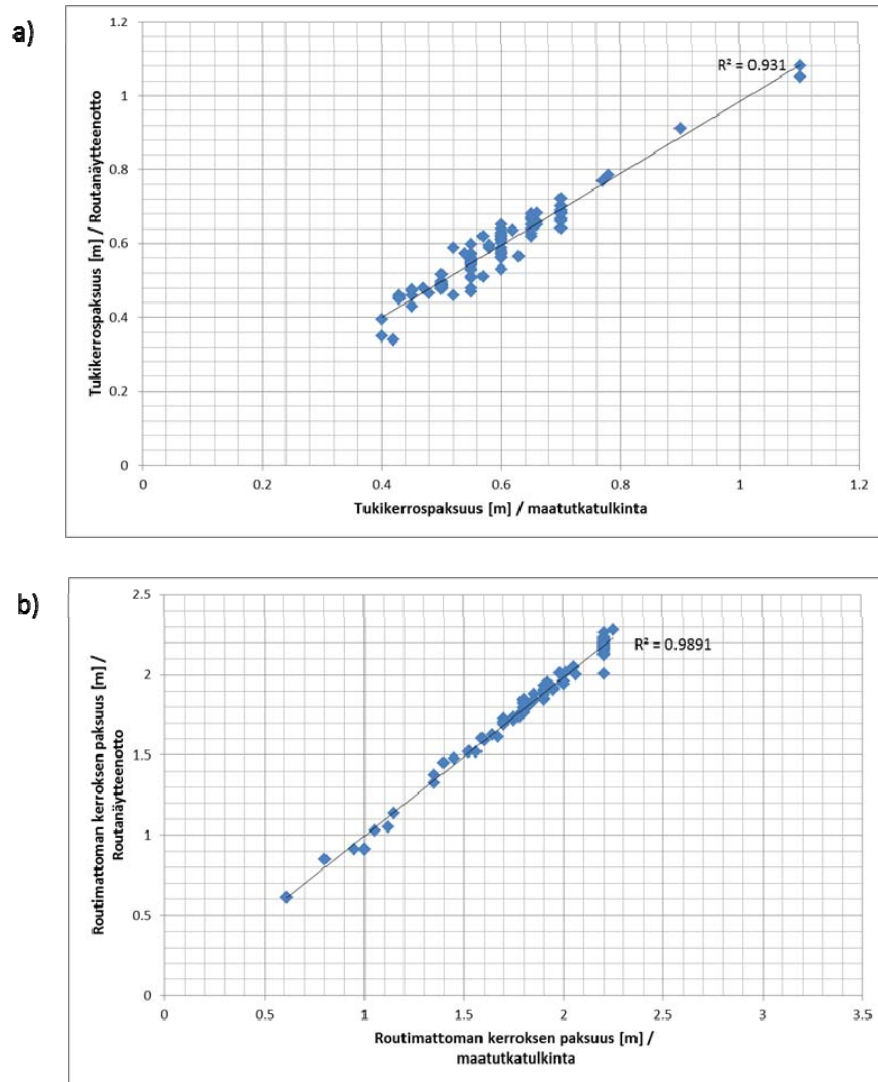
### 3.2.5 Kerrospaksuustulkintojen tarkkuus

Maatutkan menetelmätarkkuus kerrospaksuustulkinnassa on  $\pm 10\%$  kokonaispaksuudesta ilman referenssinäytteitä käytettäessä rakennemateriaalien keskimääräisiä dielektrisyysarvoja ja  $\pm 5\%$  referenssinäytteillä kalibroiduilla dielektrisyysillä. Käytännössä tukikerroksen tulkintatarkkuus on  $\pm 50$  mm ja alusrakenteen alapinnan määrittäytarkkuus on noin  $\pm 150$  mm ilman referenssikairauksia ja  $\pm 75$  mm referenssikairauksia käytettäessä. Poikkeuksia tuloksiin voivat tehdä voimakkaat kosteusvaihtelut rakenteessa kesämittauksissa tai voimakas routaheijaste talviaineistossa. Virheiden välttämiseksi maatulka-aineistoa ei kerrospaksuustulkintoja varten tulisi tehdä välittömästi voimakkaan sateen jälkeen eikä roudan sulamisen aikana loppukeväästä.

Kuvassa 38 on menetelmätarkkuuden arvioinnin esimerkkinä esitetty alustavan rakennepaksuustulkinnan korrelaatio referenssikairauksina tehtyihin rakennepaksuusmäärittäyksiin. Kuvassa 38a on esitetty routatutkimusten (95 kpl) yhteydessä määritetyn tukikerrospaksuuden ja maatulka-aineistosta ennen referenssikairauksia tulkittu tukikerrospaksuuden välinen riippuvuus. Kuvaajan perusteella aineistojen seli-



tysaste on 0,93. Vastaavasti kuvassa 38b nähdään esimerkki routatutkimusten (116 kpl) perusteella määritetyn routimattoman kerroksen alapinnan syvyyden ja maatutka-aineistosta ennen kairauksia tulkitun vastaavan kerrosrajan välisestä korrelaatiosta. Tulosten perusteella voidaan myös tässä tapauksessa selitysaste todeta korkeaksi ( $R^2 = 0,99$ ).



Kuva 38. Esimerkki routanäytteenoton perusteella määritetyn kerrospaksuuden vastaavuudesta maatutkatulkintaan a) tukikerrospaksuuden ja b) routimattoman kerroksen alapinnan syvyydestä.

## 3.3 Rakennerajatutkimusten muut sovellukset

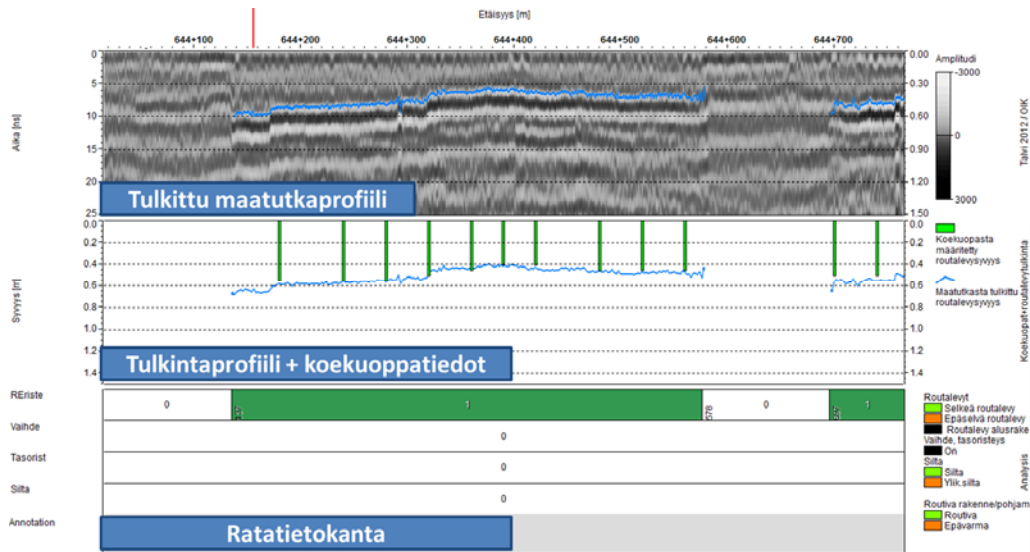
### 3.3.1 Routalevyjen paikannus

Routalevyjä on asennettu rataverkolle jo 1970-luvulta lähtien. Routalevyistä ei ole olemassa paikkansapitävää asennusrekisteriä eivätkä suunnitelmätiedot vastaa aina toteutumia. Routalevyjen asennussyvyyden ja sijainnin määrittäminen on erityisen tärkeää tukikerroksen vaihtoa tai puhdistusta suunniteltaessa. Sepelinpuhdistuksen pohjatason yläpuolelle ulottuvat routalevyt tulee poistaa kaivutyönä ennen operaatiota. Alhaisen jäykkyyden omaavien, 1970-luvulla käytettyjen EPS-routalevyjen osalta myös syvemmällä olevat levyt tulee tukikerroksen vaihdon yhteydessä yleensä poistaa liiallisen palautuvan painuman välttämiseksi.

Routalevyjen paikantamiseksi maatutka on nopea ja kustannustehokas menetelmä verrattuna perinteisiin menetelmiin, kuten koekuoppiin. Suurin tarkkuus saadaan, kun maatutkan perusteella arvioituna epäselvät kohteet tarkistetaan ohjelmoiduilla koekuopilla, jolloin maastotyön osuus jää huomattavan paljon pienemmäksi kuin tiheästi säännöllisillä väleillä tehtyjen koekuoppien avulla tehtävässä routalevyjen paikantamisessa.

Routalevyn sähköiset ominaisuudet poikkeavat huomattavasti maaperän ominaisuuksista aiheuttaen maatutkasignaaliin voimakkaan heijasteen. Heijasteen polariteetti on negatiivinen, mikä johtuu eristeen pienemmästä dielektrisyysarvosta suhteessa sen yläpuoliseen raidesepeliin tai alusrakennemateriaaliin (vrt. luku 2.3.2). Kun routalevy vettyy rakenteessa, sen dielektrisyysarvo kasvaa, jonka seurauksena sen heijaste ei ole yhtä vahva kuin hyväkuntoisen levyn. Maatutkaheijasteen heijastekuvion perusteella routalevyn sijaintia ja osin myös kuntoa voidaan määrittää.

Kuvassa 39 on esitetty esimerkki routalevyjen havaitsemisesta maatutka-aineistosta ja tulkinnan tarkkuudesta. Tukikerroksen ja routalevyn dielektrisyyskontrastista johtuen hyväkuntoinen routalevy aiheuttaa vahvan negatiivisen polariteetin (mustan) ja suhteellisen tasaisen rajapinnan routalevyn pintaan. Kuvan ylimmässä profiilissa nähdään vahva heijaste, joka alkaa noin km 644+135 ja jatkuu km 644+580 saakka. Routalevyn yläpinta on tulkittu ensimmäiseen heijasterajapintaan, joka näkyy sinisenä tulkintaviivana kuvassa. Keskimmäisessä ikkunassa tulkittua routalevyheijastetta on verrattu koekuopista havaittuun routalevyyn. Maatutkatulkinnalla saatu routalevyn alku ja loppu poikkeavat koekuopilla havaitusta ollen hieman koekuopista havaittua pitempi alku- ja loppupäistä. Tuloksissa voidaan havaita myös km 644+700 alkava routalevytys sekä maatutkassa että koekuopissa. Tulosten perusteella maatutkalla havaitun routalevyn yläpinnan syvyys täsmää hyvin koekuopista määritettyyn syvyyteen. Profiilikuvan viimeisessä ikkunassa tulkitun routalevyn sijainti on merkitty rata-tietokantaan mahdollista tulevaa tarvetta ja tilastointia varten.



Kuva 39. Esimerkki routalevyjen havainnoimisesta maatutka-aineistosta.

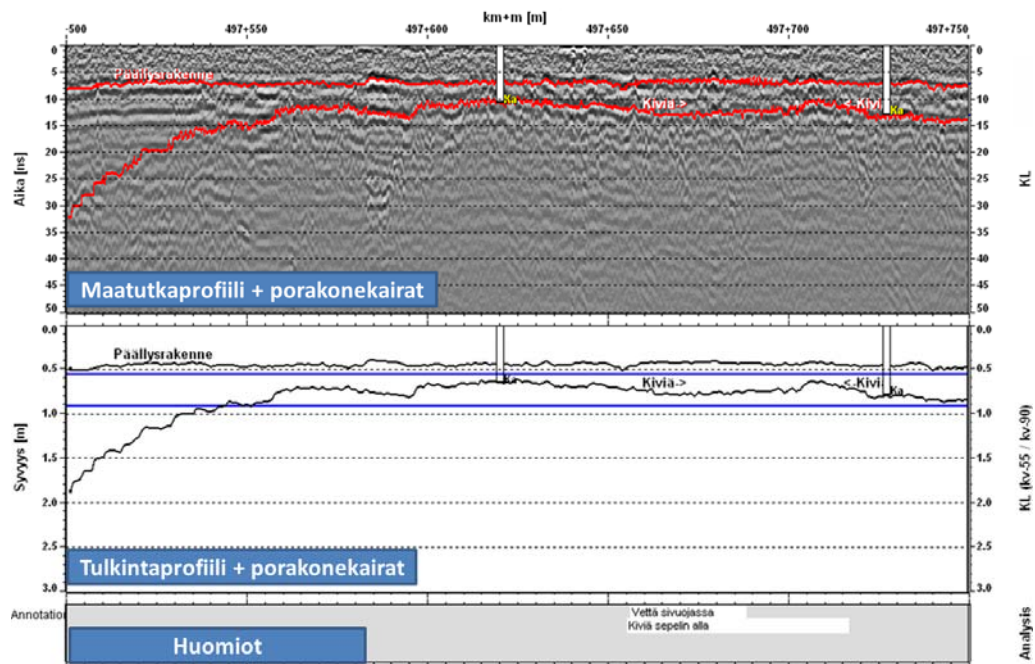
### 3.3.2 Kallioleikkauspohjan tutkimukset

Suomen rataverkolla on useita satoja kilometrejä kallioleikkauksia. Suurin osa leikkauksista on rakennettu ennen 1970-lukua ilman nykyaikaisia rakentamisvaatimuksia. Kallioleikkausten ongelmana on puutteellisen kuivatuksen vuoksi muun muassa leikkauspohjasta paantava jää ja routiminen leikkauspohjan yläpuolisessa hienontuneessa rakennekerroksessa. Matala kallioleikkaus saattaa aiheuttaa ongelmia myös radan jäykkyyden muutoskohtana.

Kallioleikkauksen ongelma-analyysissä ja kuivatusta suunniteltaessa kattava tieto kalliopinnan asemasta on tärkeää, jotta voidaan valita oikea korjaustoimenpide ja tehdä korjaussuunnitelma mahdollisimman tarkasti nopeuttaen näin toimenpiteitä lyhyissä liikennekatkoissa. Ennen suunnittelua tehdään maastotutkimukset ja kohteen katselmukset. Tulosten perusteella saadaan kokonaiskuva kallioleikkauksesta, leikkaukseen tulevan veden määrästä sekä kuivatussuunnasta ja -tasosta. Kallioleikkauspohjan riittävän syvyysaseman varmistaminen on tarpeen myös sepelinpuhdistuskoneen sujuvan etenemisen turvaamiseksi.

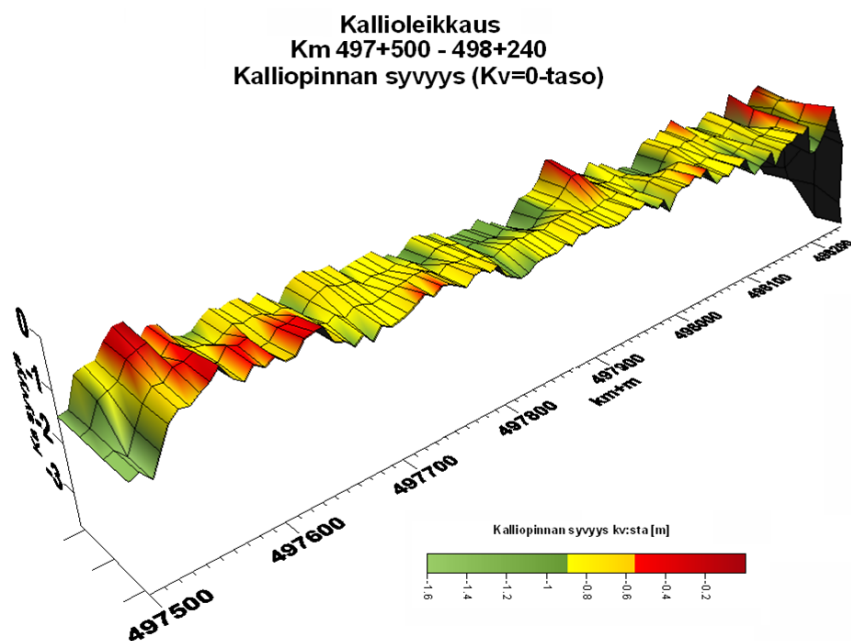
Kalliopinnan tutkimuksissa maatutka on käyttökelpoinen erityisesti kalliopinnan aseman määrittämiseen. Rikkonaisen kalliopinnan tai sen päällä olevan louheen vuoksi kalliopinnan tulkinnaissa on yleensä epävarmuutta, mistä syystä kalliopinta tulee varmistaa myös porakonekairatutkimuksilla. Kuvassa 40 on esimerkki kalliopintatulkinnaista, jossa kalliopintaheijaste on varmistettu kahdesta pisteestä porakonekairauksilla.





Kuva 40. Esimerkki kallioleikkauspohjan maatutkatulkinnasta yksittäisellä maatutkaprofiililla referenssikairauksien kera.

Ongelmallisten leikkauspohjakohteiden kartoituksessa maatutkaluotaukset tulisi tehdä 3D-maatutkalaitteistolla mahdollisimman kattavan tiedon saamiseksi, jolloin tuloksista voidaan koostaa kalliopintamalli. Kalliopintamallista on mahdollista havaita mahdollisten vesitaskujen sijainnit ja tuloksen perusteella voidaan arvioida leikkauspohjan korjaustoimenpiteitä. Usean mittalinjan tulokset tulkitaan 3D-tulkintana ja niistä voidaan laatia kuvan 41 mukainen 3-ulotteinen malli leikkauspohjasta.



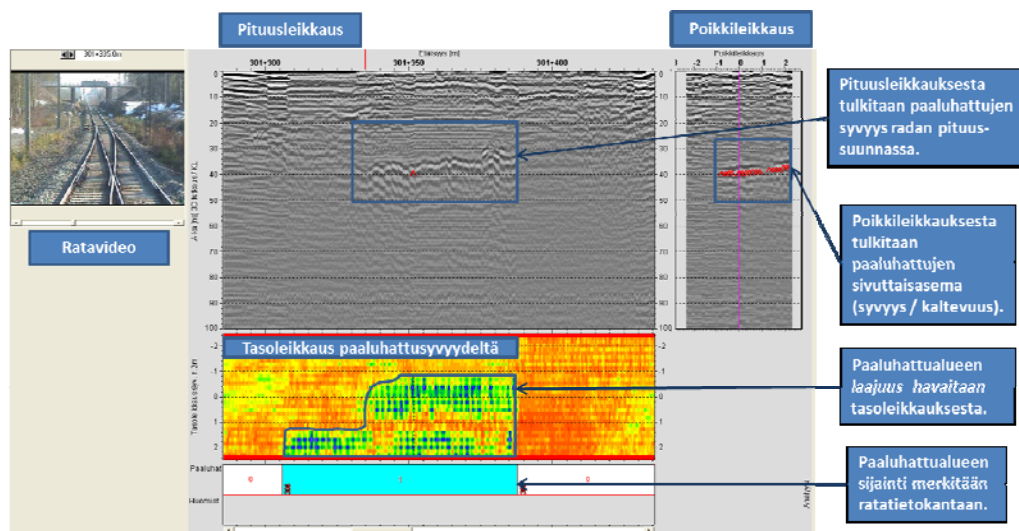
Kuva 41. Usean maatutkalinjan tulkinnoista koostettu 3D-malli kalliopinnan syvyydestä.

### 3.3.3 Pengerpaalurakenteet ja siirtymälaatat

Pengerpaalurakenteiksi luettavat paaluhattu- ja paalulaattarakenteet sijaitsevat pehmeikkökohteilla, joissa niitä on käytetty radan perustamismenetelmänä. Paaluhatturakenteiden käyttö Suomen rataverkolla on aloitettu 1970-luvulla. Rakenteiden pitkäaikaistoimivuus suuren dynaamisen kuorman, tärinän ja liikennemäärän alla on ollut vaihtelevaa. Erityisesti paaluhatturakenteissa on esiintynyt runsaasti hattujen kallistumiseen ja jatkuvaa kunnossapitoa edellyttäviin raiteen painumiin johtaneita ongelmia.

Paalurakenteiden fyysinen tarkastus on vaikeaa ja työlästä. Pengerpaalurakenteen rakenteelliset vauriot ja niiden syyt voidaan selvittää yksityiskohtaisesti vain tekemällä rakenteellinen erikoistarkastus esimerkiksi laatan reunaosan aukikaivulla. Tarkempien tutkimusten kohdentamiseksi ongelmien tarkkaa sijaintia ja ilmenemistä voidaan selvittää maatumauksella. Paalurakenteen alueita mitattaessa maatumauksignaali heijastuu paalulaatan tai -hattujen pinnasta, mikä mahdollistaa niiden aseman ja kallistuneisuuden tarkastelut. Paalurakenteita tutkittaessa mittaukset tulisi suorittaa 3D-maatumauksella. Mittausvälin tulisi olla pituus- ja sivusuunnassa korkeintaan 150 mm. Laajaa sivuttaisulottuvuutta haluttaessa mittaukset voidaan tehdä keskilinjaa molemmin puolin yhteensä 4,5 metriä leveänä linjastona.

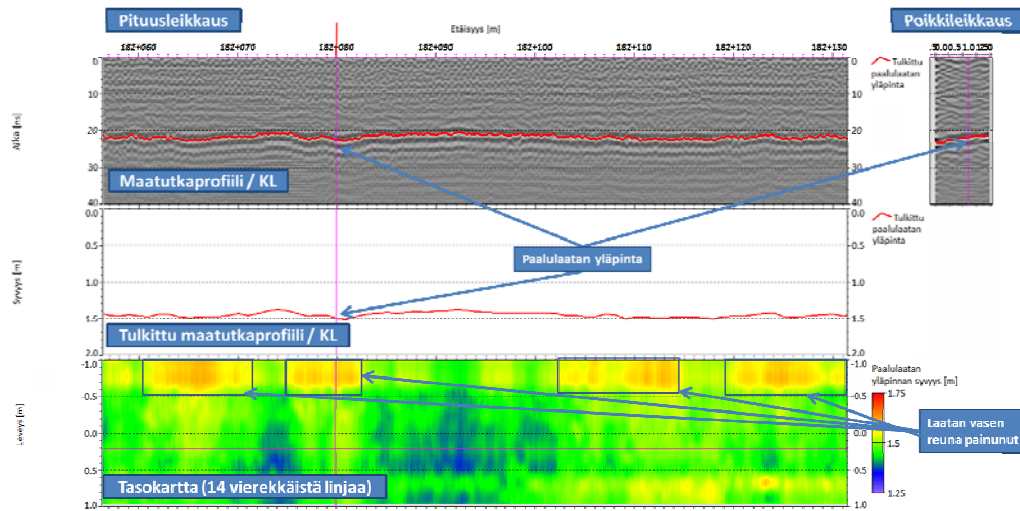
Kuvan 42 esimerkissä on esitetty paaluhattukentältä mitattua aineistoa tarkastellen paaluhattujen sijaintia kolmesta eri tarkastelusuunnasta: 1) pituusleikkauksena radan keskilinjalta, jolloin voidaan havainnoida esimerkiksi muita paaluhattuja syvemmälle painuneet hatut, 2) useasta mittalinjasta koostettuna poikkileikkauksena, jolloin voidaan nähdä hattujen kallistus sivusuunnassa ja 3) heijastuksen maksimivoimakkuutta kuvaavana amplituditasokuvana paaluhattujen tulkitusta pintatasosta.



Kuva 42. Esimerkki paaluhattujen havainnoinnista eri tarkastelusuunnista.

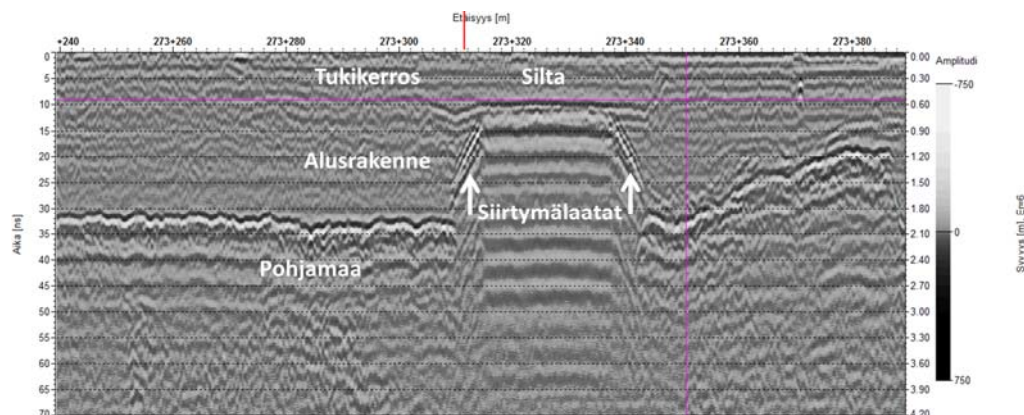
Paalulaatan vaurioituneisuustarkastelussa usean vierekkäisen linjan tulkinnoista on mahdollista huomioda paalulaatan syvyyden vaihtelua ja paikantaa mahdollisia painumia tai vaurioita paalulaatassa. Kuvassa 43 on esimerkki paalulaatan vauriotutkimuksesta. Kuvan kahdessa ylimmässä profiilissa nähdään keskilinjaa maatumaukprofiili ja tulkinta paalulaatan syvyydestä. Maatumaukprofiilin oikealla puolella on useasta

maatutkalinjasta (14 kpl) koostettu poikkileikkausprofiili kohdasta km 182+080. Profiilien alla olevasta syvyystasokartasta nähdään paalulaatan syvyys värikoodattuna karttana, jossa eri väreillä on esitetty tulkitun paalulaatan pinnan syvyyden vaihtelu kohteessa. Mittaustulosten perusteella esimerkkipaalulaatassa voitiin havaita radan kulkusuuntaan nähden vasemmalla puolella mahdollisia painuneita/vaurioituneita osuuksia. Mahdolliset vauriokohteet voidaan havaita tasokartassa jyrkkinä syvyyden muutoksina.

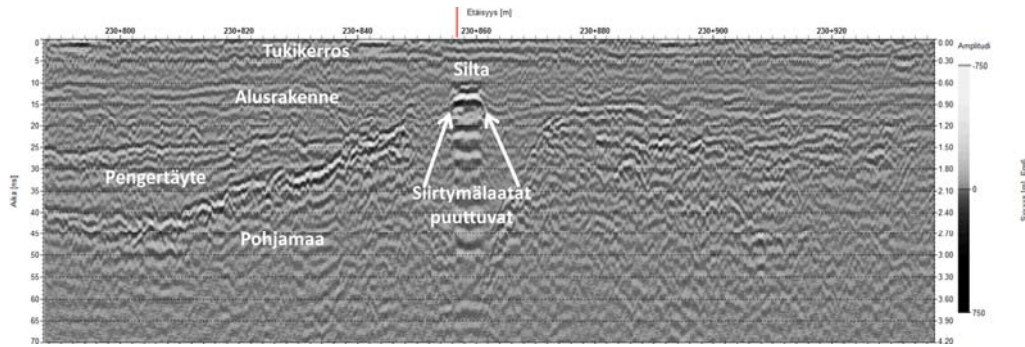


Kuva 43. 3D-maatutkan tulkinnoista koostettu syvyystasokartta paalulaatan pinnan tasosta ratapenkereen alla.

Siirtymälaattaa käytetään vähentämään sillan ja siihen liittyvän tulopenkereen yhtymäkohtaan syntyvän painumaeron haittoja. Tulopenkereen painuman syitä ovat muun muassa pohjamaan painuminen sekä dynaamisen liikennekuormituksen myötä korostuva ratapengermateriaalien tiivistyminen ja leviäminen. Maatutkalla voidaan tarkastella siltojen siirtymälaattojen olemassaoloa, asennussyvyyttä ja pituutta. Kuvassa 44 on esimerkki sillasta, jonka molemmissa päissä voidaan havaita siirtymälaatat ja kuvassa 45 vastaavasti sillasta ilman siirtymälaattoja.



Kuva 44. Siirtymälaattojen havaitseminen maatutka-aineistosta.

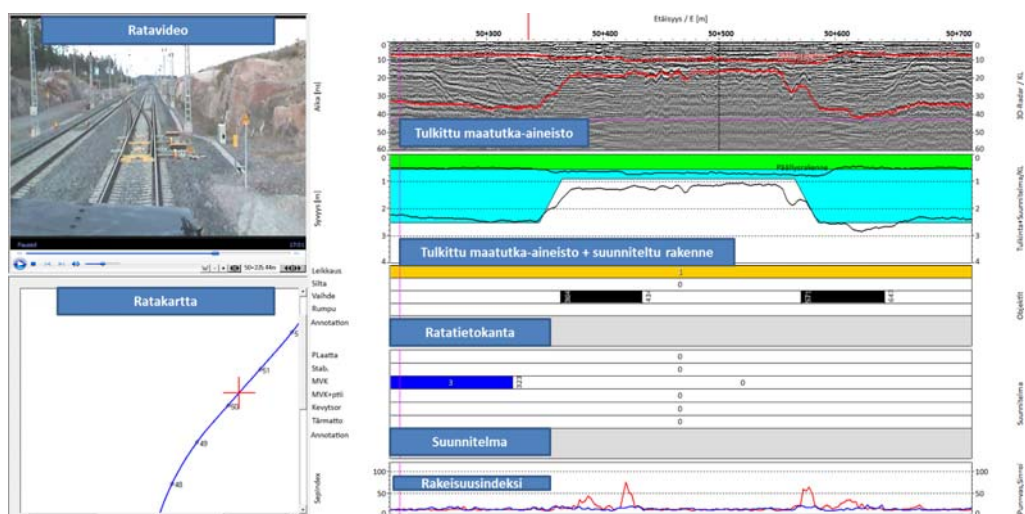


Kuva 45. Esimerkki sillasta ilman siirtymälaattoja.

### 3.3.4 Uusien rakenteiden laadunvarmistus

Uusien ratarakenteiden laadunvalvonta auttaa tilaajaa varmistamaan tilatun työn kel-  
poisuuden. Perinteisesti laadunvalvontatyö on tehty pistemäisinä tarkastuksina ja  
laboratoriotutkimuksina sekä työnaikaisena näytteenottona. Maatutkamenetelmää  
käyttämällä on mahdollista saada jatkuva tieto rakentamisen laadusta. Menetelmän  
avulla saadaan kartoitettua toteutuneiden rakennekerrosten paksuudet sekä tukiker-  
roksen hienontuneisuus ja tasalaatuisuus (ks. luku 4.6). Myös asennettujen routa-  
levyjien sijainti ja syvyys voidaan kartoittaa maatutka-aineistosta.

Kuvassa 46 on esitetty esimerkkituloste uuden ratarakenteen laaduntarkastus-  
mittauksista ennen liikennöinnin aloittamista vuonna 2007. Mittauksilla voidaan  
myös verrata toteutuneita kerrospaksuuksia suunniteltuihin rakenteisiin ja näin tal-  
lentaa urakoitsijalle ja tilaajalle dokumentti kohteen alkutilanteesta rakentamisen  
valmistuttua. Mittaustuloksista saadaan myös tilanne ennen liikennöinnin aloitta-  
mista, mikä mahdollistaa kunnon kehittymisen monitoroinnin esimerkiksi raidesepe-  
lin hienontumisen ja ratapenkereen painumien osalta.



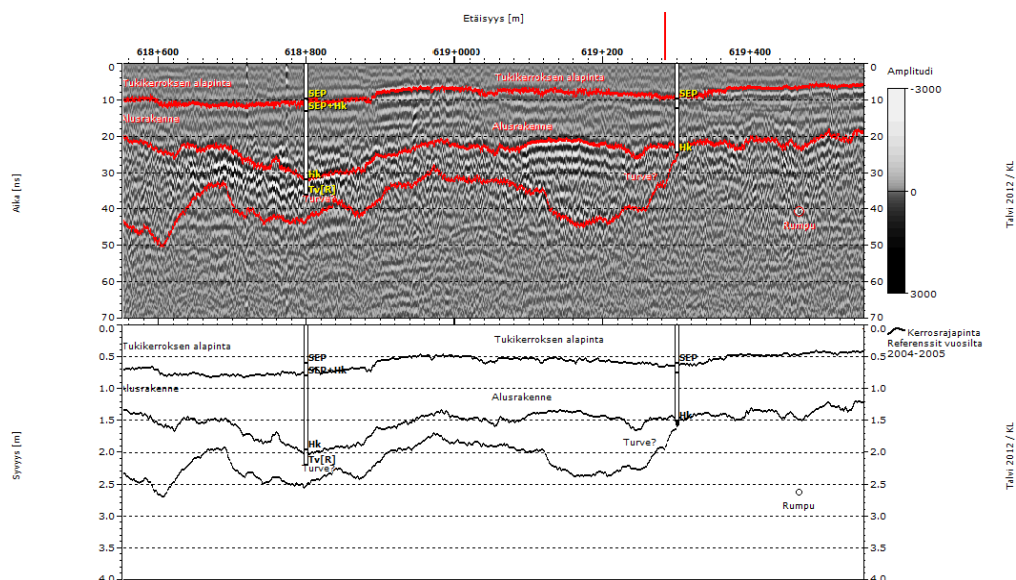
Kuva 46. Rakennekerrospaksuuksien laadunvalvontamittausesimerkki, johon tul-  
kittujen kerrospaksuuksien lisäksi on merkitty suunnitellut rakenteet, ra-  
tatietokanta, pohjanvahvistussuunnitelma sekä tukikerroksen rakeisuus-  
indeksi.



### 3.4 Rakennekerrospaksuuksien esittämismuodot

Maatutkatulokset on mahdollista tulostaa useaan eri muotoon. Tiettyyn pituusmittakaavaan (esimerkiksi 1 km / sivu) tulostetun profiilitulkinnan lisäksi maatutkatulkinnat voidaan tulostaa taulukoihin, kartoille, tilastoiksi sekä TEKLA-muodossa, jolloin tulokset voidaan siirtää rajapintana muihin suunnitteluohjelmiin.

Rakennekerrospaksuuksia voidaan esittää profiilikuvana, jossa nähdään kerrospaksuudet jatkuvana profiilina referenssikairauksen kanssa. Profiilitulosteessa vaakakselilla on etäisyys km+m formaatissa ja pystyakselilla syvyys joko aikana [ns] maatutkaprofiilissa tai syvyytenä [m] tulkintaprofiilissa. Kuvassa 47 on esitetty tyypillinen 1000 metriä pitkä keskilinjaprofiilituloste. Kuvaan voidaan haluttaessa liittää myös esimerkiksi suunnitteluperusteiden mukaisia rajaviivoja, jolloin voidaan havainnoida rakennekerrospaksuuksien täyttymistä nykyisillä rakennekerrospaksuuksilla.



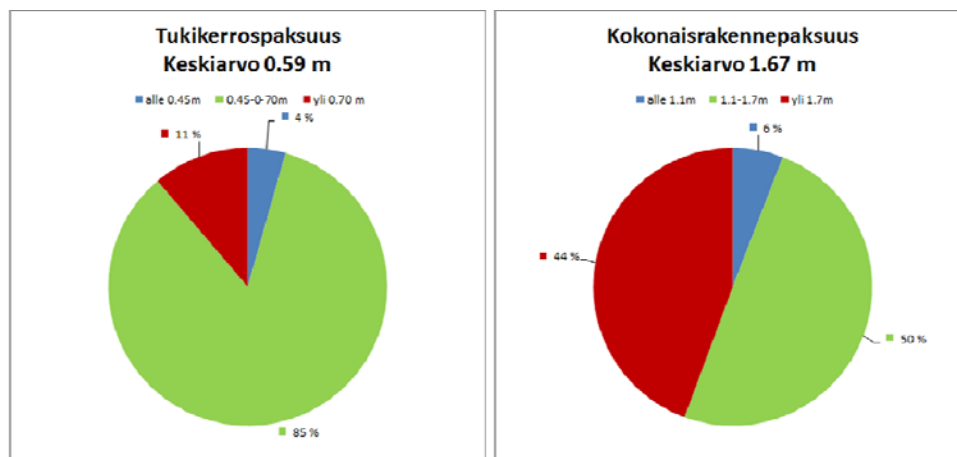
Kuva 47. Esimerkki maatutkatulkinnan profiilikuvasta, jossa yläpuolisessa ikkunassa maatutkaprofiili ja alapuolella tulkintaprofiili ilman maatutkakavaa. Molempiin profiileihin on lisätty linjalla tehdyt referenssikairaukset.

Tulkinnat on mahdollista tulostaa myös taulukkomuotoon halutulla pistevälillä joko ratakilometreihin tai koordinaatteihin sidottuna. Vakiotulostuspisteväli voi olla 1–10 metriä tarpeen mukaan. Samaan taulukkoon voidaan tulostaa tulokset usealta vierekkäiseltä linjalta. Koordinaatteihin sidotuissa tuloksissa tulostuspisteillä on X,Y,Z-koordinaatit, jolloin ne voidaan siirtää maastomalliin suunnittelun tueksi. Koordinaattitulostusta varten tarvitaan radan keskilinjän X,Y,Z-koordinaatit, joiden avulla tulospisteiden sijainnit lasketaan taulukkoon. Taulukossa 5 on esitetty esimerkki tulostaulukosta, jossa rakennekerrosrajojen tulkitut syvyydet on esitetty 5 metrin välein.

Taulukko 5. Esimerkki tulostaulukosta, johon on merkitty rakennekerrosten alapinnan syvyydet.

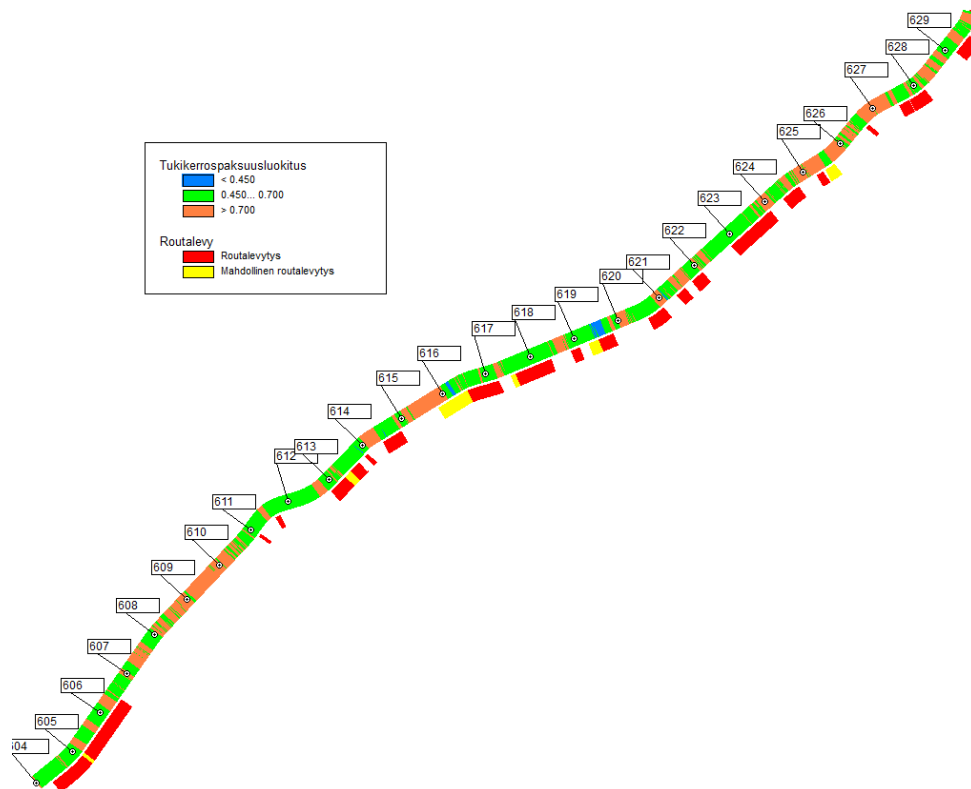
Maatutkatulkinta. Tulostuspisteväli 5m Km 552-630 Pääraide / KL					
Sijainti [km+m]	Rakennetulkinta				
	Sepeli_Syv	Alusrak_Syv	Penger_Syv	Pohjamaan kerroksia	Tulkittu Kalliopinta
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
576+837	0.57	1.30	2.71	0.00	0.00
576+842	0.57	1.35	2.75	0.00	0.00
576+847	0.53	1.41	2.77	0.00	0.00
576+852	0.58	1.53	2.85	0.00	0.00
576+857	0.56	1.55	2.82	0.00	0.00
576+862	0.59	1.63	2.90	0.00	0.00
576+867	0.58	1.63	2.93	0.00	0.00
576+872	0.63	1.67	2.88	0.00	0.00
576+877	0.58	1.68	2.94	0.00	0.00
576+882	0.62	1.67	2.97	0.00	0.00
576+887	0.60	1.70	3.01	0.00	0.00
576+892	0.59	1.75	3.00	0.00	0.00
576+897	0.61	1.77	2.97	0.00	0.00
576+902	0.58	1.82	2.93	0.00	0.00
576+907	0.61	1.87	2.93	0.00	0.00
576+912	0.62	1.88	2.89	0.00	0.00
576+917	0.64	1.94	2.93	0.00	0.00
576+922	0.66	1.95	2.94	0.00	0.00
576+927	0.67	1.93	2.94	0.00	0.00
576+932	0.66	1.90	2.94	0.00	0.00

Syvyystuloksista on mahdollista laskea tilastollisia parametreja, kuten eri kerrospaksuusluokkien jakaumia. Tuloksia voidaan esittää esimerkiksi rataosittain tai kilometreittäin. Kuvan 48 esimerkissä on esitetty tukikerroksen ja rakennekerrosten kokonaispaksuuksien jakaumat.



Kuva 48. Esimerkkikuvaajat tukikerros- ja kokonaisrakennepaksuuden jakaumista paksuusluokittain.

Tuloksia voidaan tarkastella myös pidemmällä jaksolla GIS-karttatulosteiden avulla. Tulosten esittäminen GIS-kartoilla on tehokas tapa näyttää mittaustulokset yhteen-  
vetona, josta saadaan helposti kokonaiskuva rataosan ongelmakohdista ja niiden  
riippuvuudesta esimerkiksi raidesepelin paksuuteen. Kuvan 49 GIS-karttaesimerkissä  
on esitetty tukikerroksen paksuusluokitus sekä maatutka-aineistosta tulkittujen rou-  
talevyjen sijainnit.



Kuva 49. Esimerkki GIS-kartasta, jossa on esitetty tukikerrospaksuusluokitus ja routalevyjen sijainnit.



## 4 Tukikerroksen kunnon tutkimukset

### 4.1 Tukikerroksen kunnon tuntemisen merkitys

Tukikerroksen pääasiallisena tehtävänä on tukea raidetta siten, että raiteen asento ja asema säilyvät. Liikennekuormituksen ja ympäristörasituksen johdosta tapahtuva raide-sepelin jauhautuminen sekä tukikerrokseen ulkoisista lähteistä kerääntyvä hieno-rakeinen aines heikentävät tukikerroksen kykyä suoriutua tästä tehtävästä. Hienone-misen edetessä raidegeometrian parantamiseksi edellytetty raiteen tukeminen muut-tuu tehottomaksi. Lopulta tukikerros on elinkaaritaloudellisinta puhdistaa tai uusia. Jäljellä olevaa käyttöikää ja tukikerroksen puhdistustarvetta arvioitaessa sen hienon-tuneisuuden tunteminen on tärkeää.

Pistemäisesti hienontuneisuutta tarkastellaan tukikerroksista otetuista näytteistä määritettävän rakeisuusluvun avulla. Rakeisuusluku ilmentää näytteen seulonnessa mitattujen 1 mm, 8 mm ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summaa (Ratahallinto-keskus 1997). Tukikerroksen taloudellinen käyttöikä katsotaan saavutetuksi, kun rata-osan keskimääräinen rakeisuusluku saavuttaa arvon 90 (Ratahallintokeskus 2002b). Hienontuneisuuden on todettu vaihtelevan huomattavasti suhteellisen lyhyelläkin rataosalla ja myös radan poikittaissuunnassa. Siksi luotettavaan tulokseen pääsy vaa-tii tiheää näytteenottoa, jolloin tutkimus on työlästä.

Maatutkaus ja mittausaineiston analysointi ovat kehittyneet tasolle, jossa muutamilla näytetiedoilla kalibroimalla myös tukikerroksen hienontuneisuuden arviointi on hy-vällä tarkkuudella mahdollista. Tarkastelu on pistemäisyyden sijasta ratalinjalla jat-kuvaa. Tämä luo edellytykset pahiten hienontuneiden tukikerrososuuksien valikoin-tiin, jolloin uusimistoimenpiteet voidaan kohdentaa vain niihin, ja poistaa siten pi-dempien osuuksien pahimmat pullonkaulat.

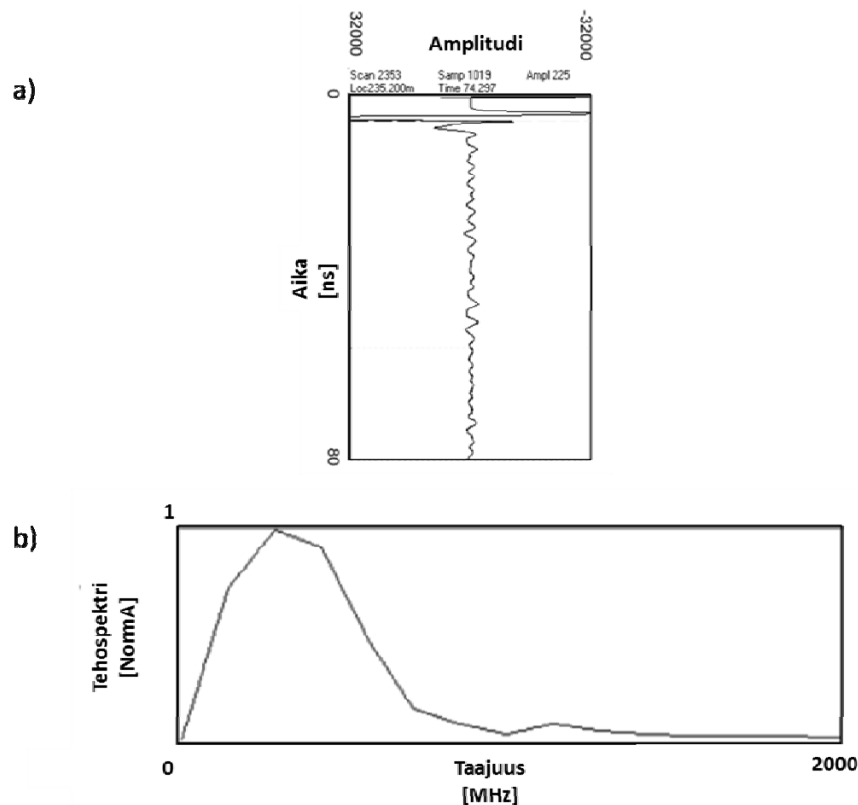
Tutkimuksellisessa näkökulmassa maatutkauksen ratalinjalta jatkuvana tarjoama, tukikerroksen hienontuneisuutta kuvaava numeerinen arvo mahdollistaa hienontumi-seen vaikuttavien eri tekijöiden tilastollisen merkittävyyden tarkastelun. Vastaavasti voidaan tarkastella tukikerroksen hienontuneisuuden merkitystä raidegeometrian py-syvyydessä ja tukemisen tehokkuudessa.

Tukikerroksen hienontuneisuuden arviointitarve on myös uuden tai puhdistetun tuki-kerroksen laadunvalvonnan yhteydessä (ks. luku 4.6). Näytteenotolla kalibroitu maa-tutkaus on näissä tapauksissa ensisijainen, jatkuvan tiedon mahdollistava menettely.

## 4.2 Teoreettinen perusta

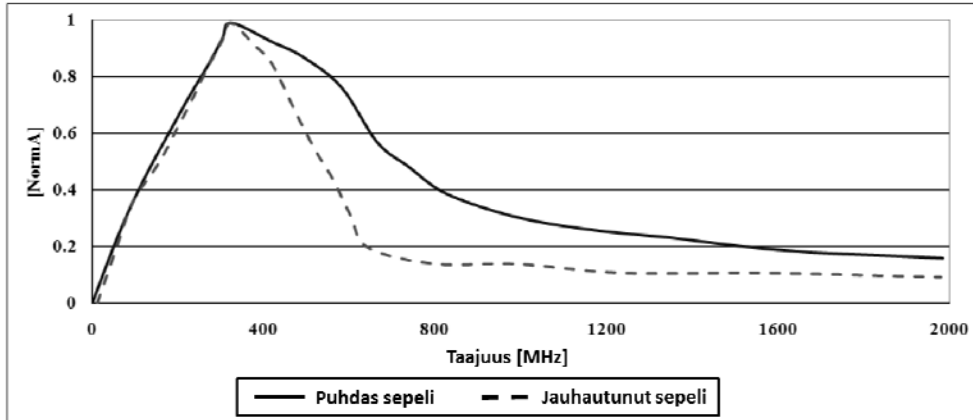
Tukikerroksen laadun tutkimukset maatutkalla on aloitettu Suomessa vuonna 2006, jolloin menetelmän kehittäminen käynnistettiin Tampereen teknillisen korkeakoulun ja Roadscanners Oy:n yhteisenä kehitysprojektina. Nykyisin menetelmä on Suomen lisäksi laajassa käytössä USA:ssa, Portugalissa ja Etelä-Afrikassa. Menetelmä perustuu tukikerroksen rakeisuusluvun määrittämiseen maatutkasignaalin taajuusanalyysin perusteella (Silvast et al., 2010).

Jotta maatutkasignaalin taajuussisältöä voidaan tutkia, normaalisti aikatasossa esitetty signaali muunnetaan taajuustasoon Fourier-muunnoksen avulla. Kuvassa 50a maatutkasignaali on esitetty aikatasossa, ja kuvassa 50b sama signaali on muunnettu taajuustasoon, jolloin signaalista voidaan tutkia sen taajuuksien jakaumaa.



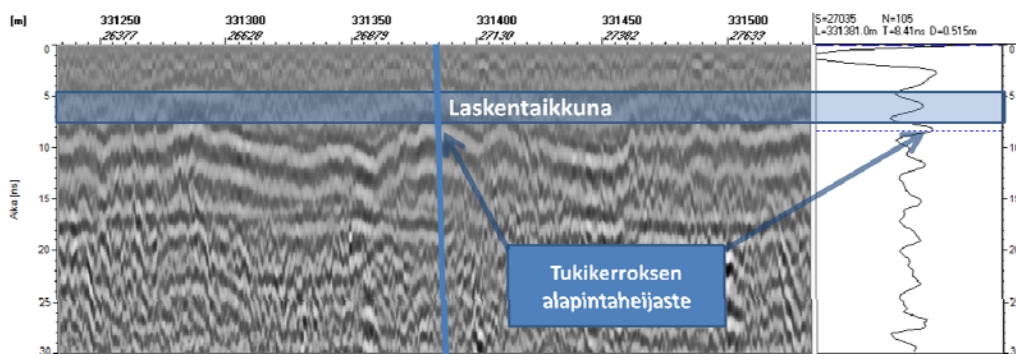
Kuva 50. a) Maatutkasignaali aikatasossa ja b) Fourier-muunnettu signaali taajuustasossa taajuusspektriesityksenä.

Puhdas ja hienoainespitoinen raidesepeli voidaan erottaa tukikerroksesta takaisin heijastuneiden taajuuksien spektriä tarkastelemalla. Hienoainespitoinen raidesepeli absorboi signaalista korkeat taajuudet. Mitä enemmän raidesepelissä on hienoainesta, sitä enemmän signaali vaimenee korkeiden taajuuksien osalta. Ilmiötä kutsutaan dielektriseksi dispersioksi. Kuvassa 51 on esitetty esimerkki puhtaan ja jauhaantuneen raidesepelin taajuusspektreistä. Kuvasta voidaan havaita korkeiden taajuuksien vaimeneminen jauhaantuneessa raidesepelissä verrattaessa sitä puhtaan raidesepelin taajuusspektriin.



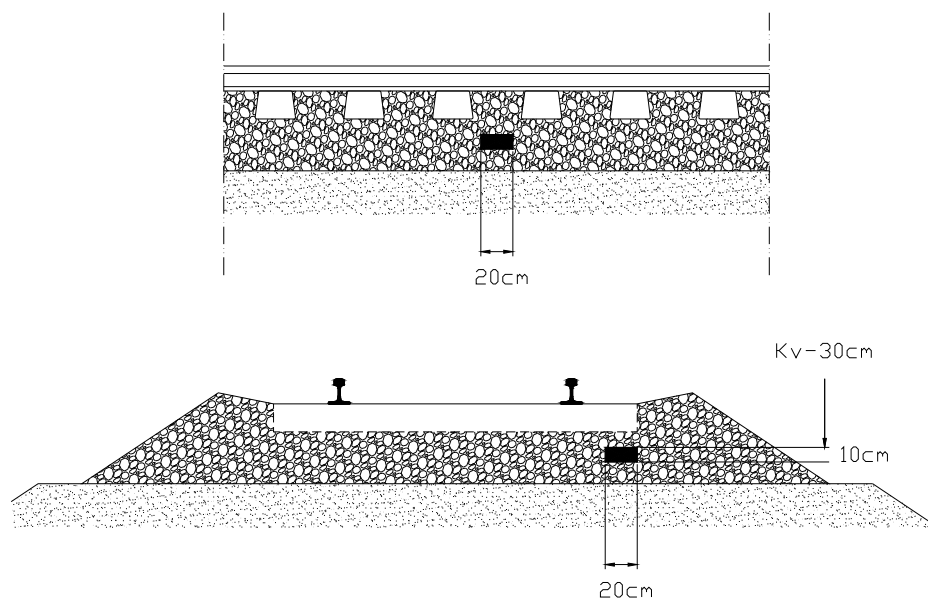
Kuva 51. Periaatekuva puhtaan (kiinteä viiva) ja jauhautuneen raidesepelin (katkoviiva) taajuusspektrierosta.

Hienoimmaksi murskautunut raidesepeli sijaitsee sepelikerroksen alaosassa, johon se varisee tukikerroksen pintaosista. Laskemalla raidesepelistä heijastuneen signaalin taajuussisältö Fourier-analyysillä tietyltä syvyydeltä saadaan tulokseksi numeerinen parametri, joka voidaan kalibrointinäytteitä hyväksi käyttäen laskea rakeisuusindeksiluvuksi. Kuvassa 52 on esitetty yksittäinen pyyhkäisy oikealla ja maatutkaprofiili vasemmalla. Molempiin ikkunoihin on merkitty syvyysikkuna, jossa raidesepelin taajuuslaskenta suoritetaan.



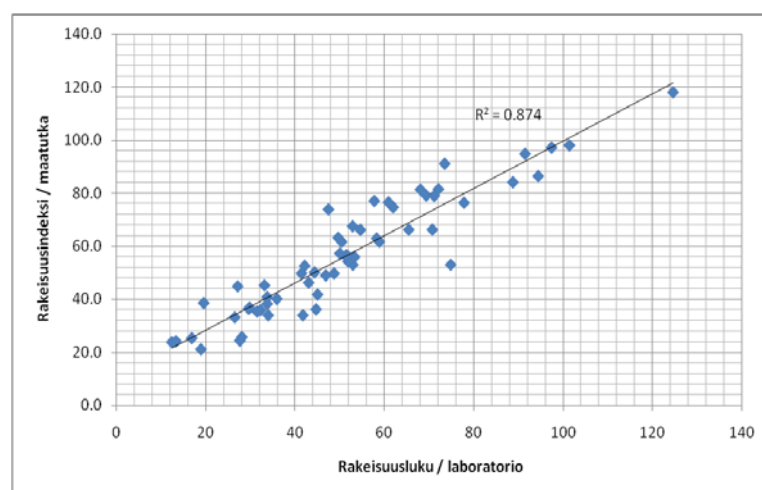
Kuva 52. Taajuusspektrin laskentaikkuna tukikerroksen alaosassa näytteenottotolsa.

Vertaamalla maatutka-aineistosta laskettuja arvoja laboratoriossa määritettyihin rakeisuuslukuihin voidaan saatu dispersioparametri kalibroida rakeisuusindeksiksi, jonka avulla tukikerroksen rakeisuutta on mahdollista arvioida jatkuvana profiilina. Taajuusanalyysilaskennat tehdään yleensä rakeisuusnäytesyvyydeltä (KV-30–40 cm), jotta laboratorioissa analysoituja rakeisuusnäytteitä voidaan käyttää kalibroitaessa maatutkatulokset vastaamaan rakeisuuslukua. Maatutkauksen tulokinnan referenssinäytteet otetaan kuvan 53 mukaisesta kohdasta. Näytteenottotiheys on noin 1 näyte / 5 km.



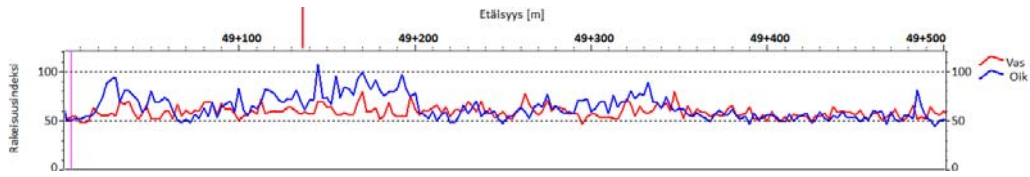
Kuva 53. Tukikerrosnäytteen ottokohta.

Rakeisuusnäytteiden ja rakeisuusindeksin kalibroinnissa on tehty laboratorio- ja kenttätutkimuksia, joiden perusteella on kehitetty laskenta-algoritmi rakeisuusindeksin laskemiseksi maatutka-aineistosta. Kuvassa 54 on esitetty 61 rakeisuusnäytteen perusteella kalibroidun laskenta-algoritmin korrelaatiokuvaaja rakeisuusluvun ja rakeisuusindeksin välillä. Pystyakselilla on maatutkasignaalista taajuusanalyysin perusteella laskettu rakeisuusindeksi ja vaaka-akselilla tukikerrosnäytteestä pesuseulonnalla määritetystä raekokojakaumasta laskettu rakeisuusluku. Kuvasta voidaan nähdä rakeisuusindeksin ja rakeisuusluvun välisen selityssasteen olevan huomattavan hyvä ( $R^2=0.87$ ).



Kuva 54. Maatutkasignaalista laskettujen rakeisuusindeksien ja laboratoriossa määritettyjen tukikerrosnäytteiden rakeisuuslukujen korrelaatiokuvaaja.

Rakeisuusindeksi lasketaan jatkuvana linjana 5 metrin pituisella askeltavalla laskentaikkunalla. Tällöin tulokseksi saadaan kuvassa 55 nähtävää esimerkkiä vastaava tukikerroksen rakeisuusindeksikäyrä pölkyn molemmista päistä.



Kuva 55. Esimerkki tukikerroksen rakeisuusindeksistä laskettuna pölkyn päistä raiteen vasemmalta (punainen) ja oikealta (sininen) reunalta.

### 4.3 Rakeisuusindeksiluokitus

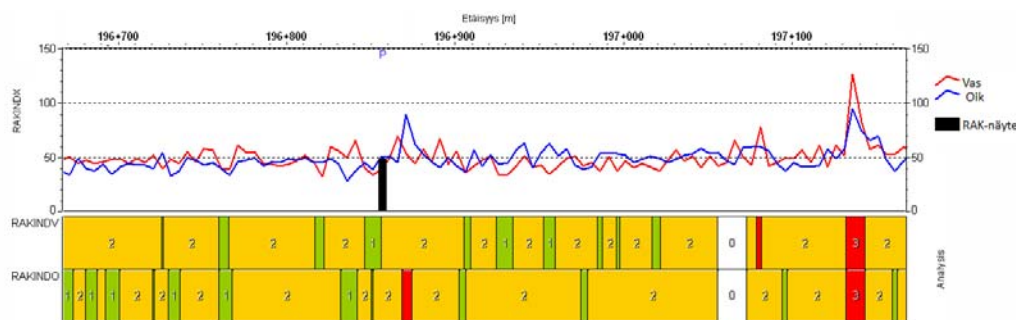
Koska rakeisuusindeksikäyrän arvo vaihtelee rakeisuuden mukaan lyhyilläkin väleillä eikä kunnossapitoa ole mielekästä tehdä hyvin lyhyissä jaksoissa, voidaan luokittelujen tulosten perusteella määrittää toimenpidettä vaativia pidempiä jaksoja. Tämän vuoksi rakeisuusindeksikäyrän laskennan jälkeen rakeisuusindeksi-arvot luokitellaan kolmeen eri luokkaan.

Taulukko 6. Rakeisuusindeksiluokitus.

Luokka	Rakeisuusindeksi-arvo	Selite
0	Poikkeavat arvot*	Sillat, tasoristeykset, vaihteet
1	< 40	Karkearakeinen sepeli
2	40 – 70	Hienontunut sepeli
3	> 70	Voimakkaasti hienontunut sepeli

\*Ei oteta huomioon tilastoinnissa

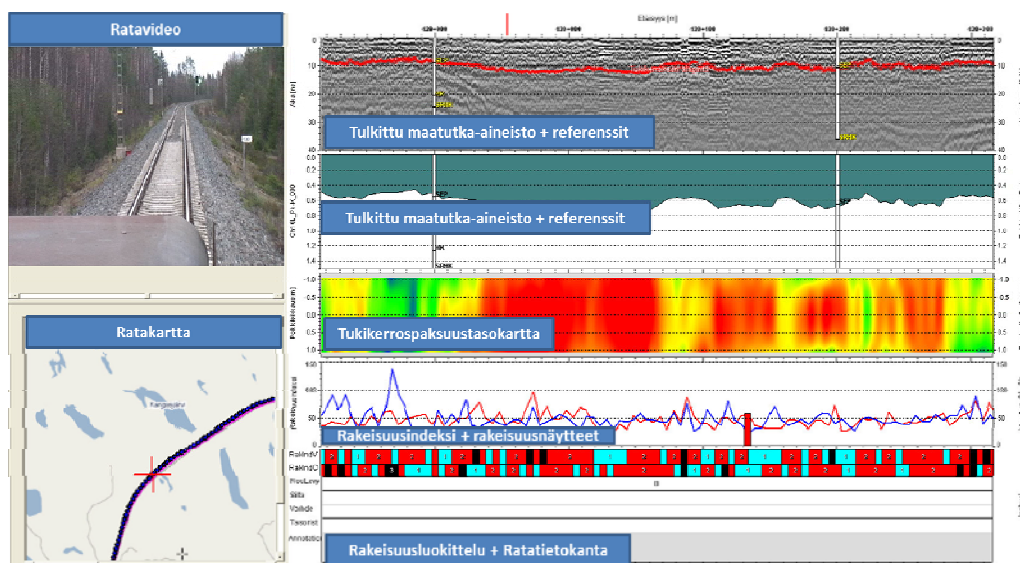
Kuvan 56 yläikkunassa nähdään esimerkki rakeisuusindeksikäyrästä radan molemmilta reunoilta sekä rakeisuusnäytteestä laboratorioissa määritetty rakeisuusluku. Alemmassa ikkunassa rakeisuusindeksit on luokiteltu rakeisuusindeksiluokkiin.



Kuva 56. Esimerkki maatutkadatasta lasketusta tukikerroksen rakeisuusindeksistä laskettuna raiteen vasemmalta (pun.) ja oikealta (sin.) puolelta pölkyn päistä. Musta palkki osoittaa laboratorionäytteestä määritettyä rakeisuuslukua ja kirjain palkin yläpuolella näytteen sijaintia (P=pohj). Alemmassa ikkunassa rakeisuusindeksi on luokiteltu kolmeen luokkaan.

## 4.4 Rakeisuusindeksitulosten esittämisformaatit

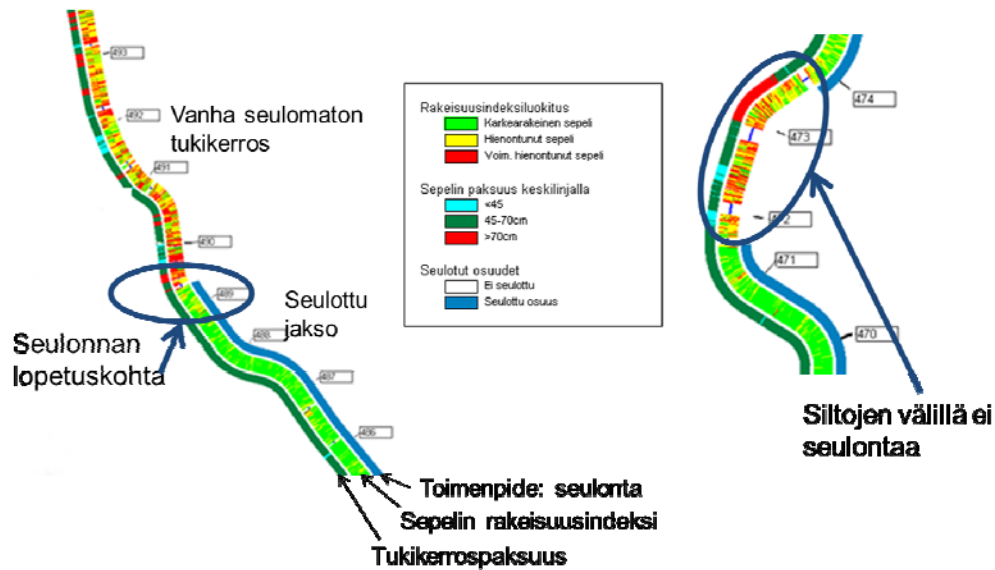
Rakeisuustuloksia on mahdollista tarkastella linjatulosteena yhdistetysti muun radalla mitatun tiedon kanssa. Kuvassa 57 on esitetty datanäkymä, jossa rakeisuusanalyysin lisäksi on esitetty maatulka-aineistosta tulkittu tukikerrospaksuus yhdessä ratavideon ja kartan kanssa. Yhdistetyn aineiston tarkastelun avulla tuloksia on selkeä arvioida ja esimerkiksi suunnitella kunnostustoimenpiteiden jaksotusta.



Kuva 57. Esimerkinäkymä Railway Doctorin käyttöliittymästä. Kaksi ylimmäistä ikkunaa sisältävät 3D-maatutkan aineiston ja tulkinnan sekä referenssikairausten kerrospaksuustiedot keskilinjalta. Digitaalivideo sekä kartta mittalinjasta on esitetty profilitietojen vasemmalla puolella. Maatulka-profiilien alla tasokartta sepelikerroksen paksuudesta (väriskaala 350 mm (sin.) – 700 mm (pun.)). Tasokartan alla on esitetty tukikerroksen rakeisuusindeksi pölkkyjen päistä laskettuna vasemmalta (punainen) ja oikealta (sininen) reunalta sekä rakeisuusluvut sepelinäytteenotoista. Viimeisenä profilitietona on esitetty analyysipalkisto, johon on luokiteltu tukikerroksen laatu sekä merkitty routalevyjen, siltojen, tasoiteysten, vaihteiden sijainnit.

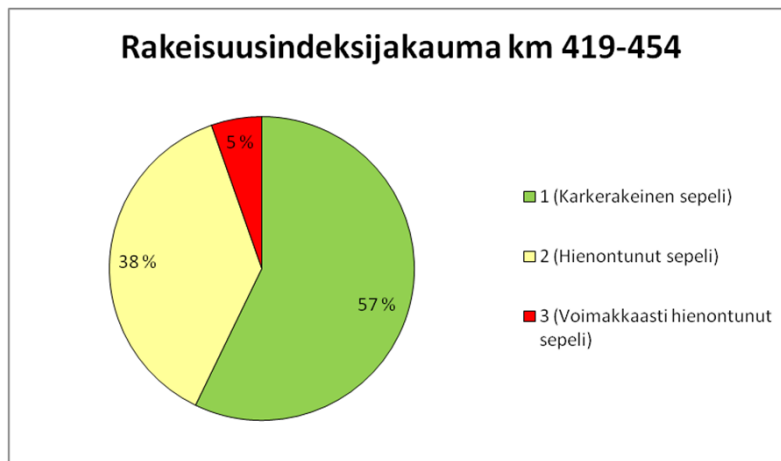
Rakeisuusindeksitulokset voidaan esittää myös GIS-kartalla, jonka avulla on mahdollista helposti havainnollistaa rakeisuusindeksituloksia laajalla alueella. Karttaan on mahdollista lisätä myös esimerkiksi kunnossapitotoimenpiteitä tai muita tunnettuja ominaisuuksia tutkittavasta kohteesta. Kuvassa 58 nähdään esimerkki GIS-kartasta, johon on merkitty rakeisuusindeksiluokkatiedon lisäksi toteutuneet seulontajaksot sekä tulkittu tukikerrospaksuus. Kartan perusteella nähdään selvästi seulonnan lopetuskohta sekä siltojen vuoksi seulomatta jätetty osuus.





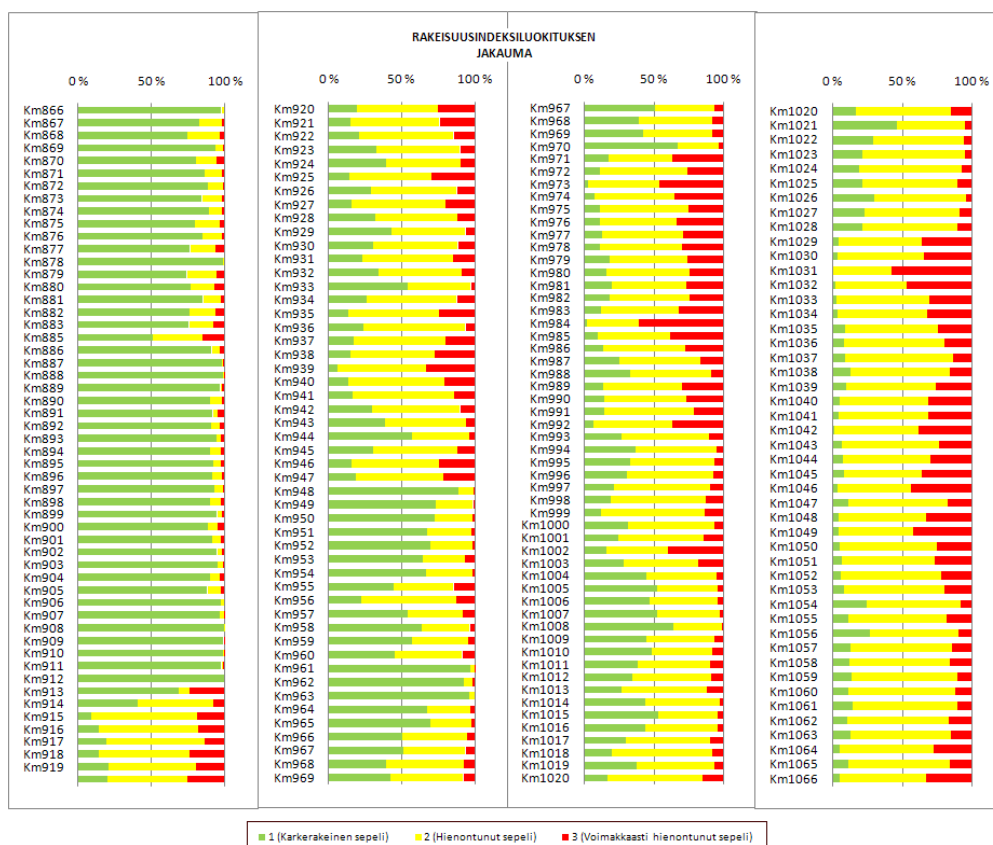
Kuva 58. Esimerkki rakeisuusindeksitulosten, tukikerrospaksuuden ja kunnossapitotoimenpiteiden esittämisestä RD-GIS-karttana.

Luokiteltujen rakeisuusindeksitulosten perusteella on myös mahdollista laskea luokien tilastollista jakaumaa esimerkiksi liikennepaikkaväleittäin tai kilometreittäin. Kuvassa 59 on esitetty rakeisuusluokkajakauma 35 kilometrin pituiselta liikennepaikkaväliltä. Kuvasta voidaan nähdä raidesepelin olevan kyseisellä välillä karkearakeista 57 % osuudella ja hienontunutta tai voimakkaasti hienontunutta yhteensä 43 % osuudella.



Kuva 59. Esimerkki liikennepaikkavälikohtaisesta rakeisuusindeksiluokkajakaumasta.

Rataosakohtaisten tarkastelujen lisäksi tuloksia voidaan esittää myös kilometrikohtaisina rakeisuusindeksiluokkien jakaumina. Kuvassa 60 on esitetty rakeisuusluokkien kilometrijakaumaa 200 kilometrin pituisella rataosuudella. Rakeisuusindeksitilastosta voidaan selkeästi havaita karkearakeisen tukikerroksen kilometrit ja valita tarkempaa tarkastelua sekä mahdollisesti parantamistoimenpiteitä tarvitsevat kilometriosuudet.

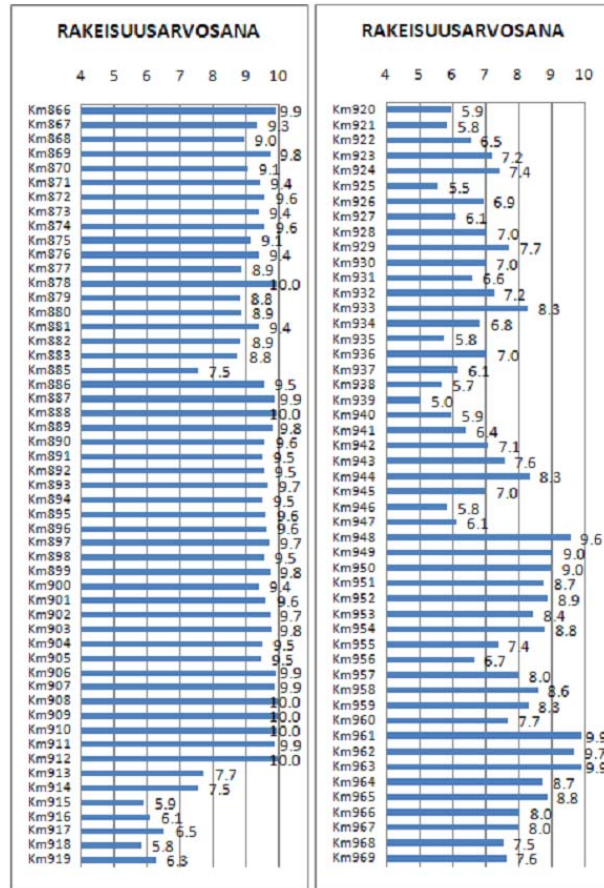


Kuva 60. Kilometrikohtainen rakeisuusindeksijakauman esitystapa.

## 4.5 Rakeisuusarvosana

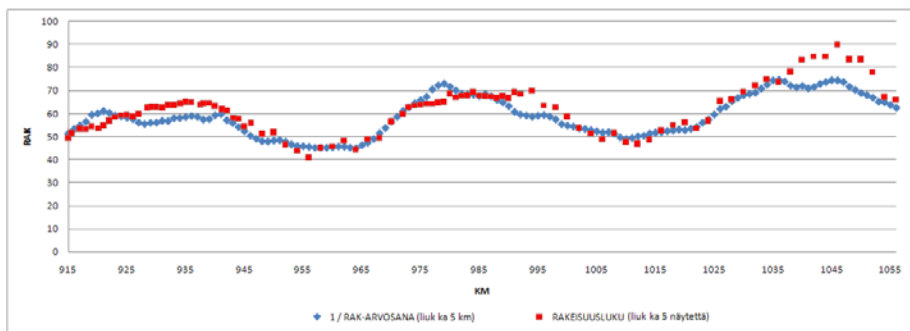
Rakeisuusindeksiluvun ja kilometrikohtaisen rakeisuusindeksiluokituksen lisäksi maatutka-aineistosta laskettua rakeisuutta voidaan kuvata myös yhdellä numerolla. Rakeisuusluokituksen tulosten perusteella ratakilometreille on mahdollista laskea rakeisuusarvosana. Rakeisuusarvosana perustuu kilometrikohtaisiin rakeisuusindeksiluokkien suhteellisiin osuuksiin ja se kuvaa yhdellä lukuarvolla raideseppelin karkearakeisuutta kullakin ratakilometrillä. Luvun perusteella on mahdollista tarkastella tukikerroksen kuntoa verkkotasolla ja helposti valikoida ensisijaisimmin seulonnan tarpeessa olevat rataosuudet.

Rakeisuusarvosanat 4-6 ilmentävät kilometriä, jolla on paljon voimakkaasti hienontunutta raideseppiä. Arvosanat 6-8 kuvaavat osuutta, jolla raideseppi on hienontunutta ja jolle sisältyy paikoin voimakkaasti hienontuneita osuuksia. Arvot 8-10 ilmentävät pääosin karkearakenteista ja mahdollisesti paikoin hienontunutta raideseppiä. Kuvassa 61 on nähtävissä esimerkki rakeisuusarvosanakuvaajasta. Kuvasta voidaan nähdä arvosanojen lasku km 912 jälkeen, johon saakka tukikerros oli uusittu mittaus-ten ajankohtana.



Kuva 61. Rakeisuusarvosanaesimerkki.

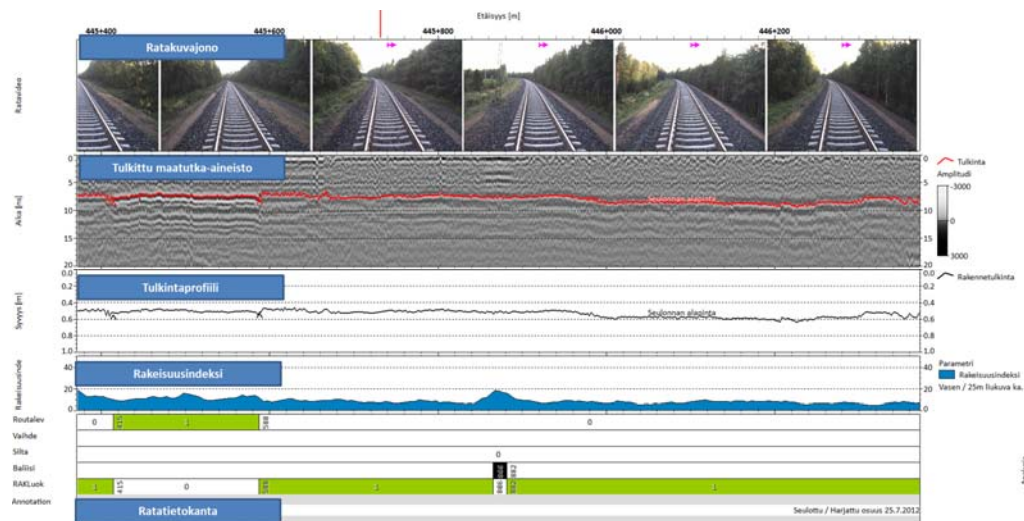
Edellisessä kuvassa esitetyn kohteen rakeisuusarvosanaa on verrattu samassa kohteessa otetuista sepelinäytteistä määritettyihin rakeisuuslukuihin. Kuvassa 62 nähdään rakeisuusluvun kanssa samaan suuruusluokkaan kalibroitu rakeisuusarvosanan käänteisluku ja rakeisuusluku aiemmin kohteesta otetuista näytteistä määritettynä. Kuvassa voidaan nähdä molempien rakeisuustulosten trendien seuraavan toisiaan huomattavan hyvin. Poikkeuksena näkyy linjan loppuosa, km 1035–1055, jossa rakeisuudet ovat suurempia näytteenotossa kuin maatutkasta lasketussa arvossa.



Kuva 62. Esimerkkirataosan näytteistä määritetyistä rakeisuusluvuista laskettu 5 näytteen liukuva keskiarvo sekä maatutka-aineistosta määritetty rakeisuusarvosanan käänteisluku samalle tasolle laskettuna.

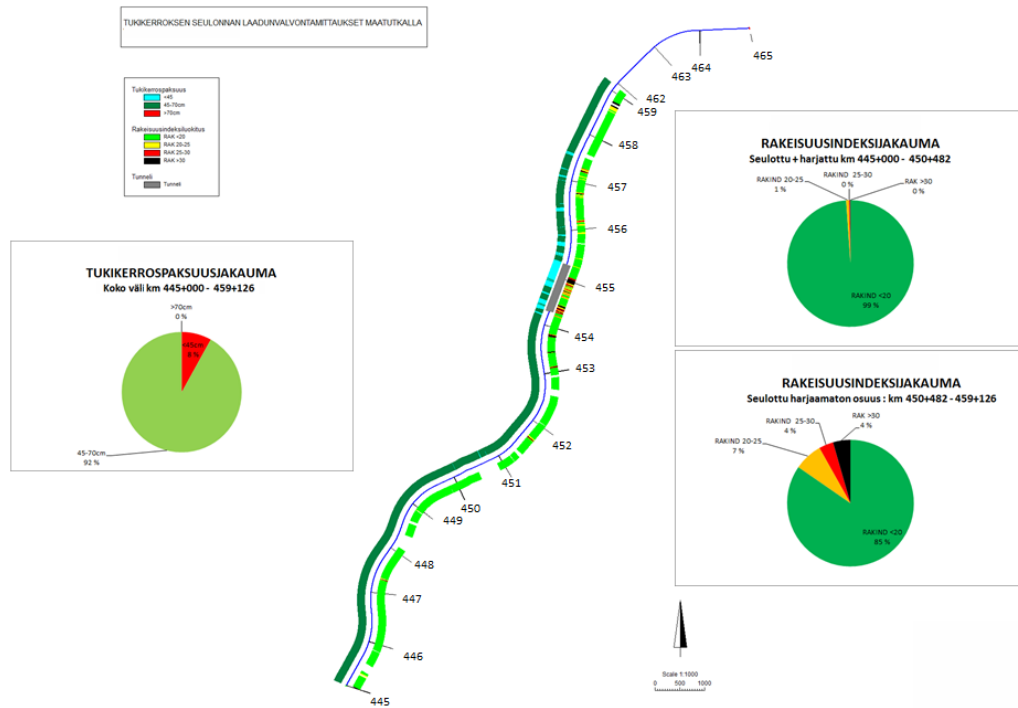
## 4.6 Uuden ja puhdistetun tukikerroksen laadunvalvonta

Maatutkan avulla voidaan suorittaa myös tukikerroksen uusimisen tai seulonnan jälkeinen laadunvalvonta. Kuva 63 esittää profiilia laadunvalvontakohteesta, jonne on tehty seulonta ja asennettu routalevy kilometrivälille 445+415-445+590. Laadunvarmistusmittausten yhteydessä saadaan tietoa tukikerroksen rakeisuudesta sekä kerrospaksuuksista jatkuvana profiilina. Laatu- ja kerrospaksuustietojen lisäksi maatutkaprofiilista nähdään tarkka sijainti asennetuille routalevyille. Kuvan tulkinnoista nähdään seulotun kerroksen alapinnan olevan keskimäärin 0,55 m syvyydessä ja maatutkalla mitatun rakeisuusindeksin olevan noin 10. Rakeisuusluokitusta ei tehdä routalevyjen eikä siltojen, tasoristeysten ja vaihteiden kohdalta niiden aineistoon aiheuttaman häiriön vuoksi.



Kuva 63. Laadunvalvontamittausten tulospöfiiiesimerkki.

Laaduntarkastusmittausten yhteydessä voidaan tuottaa tutkittavasta kohteesta myös tulokartat sekä tilastot, joissa voidaan havainnollisesti esittää saatujen tulosten poikkeamat, niiden sijainnit ja määrät. Kuvan 64 esimerkissä nähdään GIS-kartaesityksen ja tilastotiedon yhteisnäkymä seulontatyön laadunvalvontatuloksista.



Kuva 64. Laadunvalvontamittausten tulosesimerkki.

## 5 Alusrakenteen ja pohjamaan laadun tutkimukset

### 5.1 Alusrakenteen ja pohjamaan laatu

#### 5.1.1 Alusrakenteen ja pohjamaan laadun arviointitarve

Rakennekerrosten paksuuden (luku 3) ja tukikerroksen kunnon (luku 4) lisäksi alusrakenteen ja pohjamaan laadullisilla ominaisuuksilla on määräävä vaikutus radan käyttäytymiseen liikennekuormituksen alaisena, radan routimiseen sekä ratapenkeleen vakavuuteen.

Alusrakennekerrosten paksuuden lisäksi myös niiden materiaalien laatu on vaihdellut eri vuosikymmeninä tehdyissä rakentamistöissä. Materiaalivaatimukset ovat liikennöintinopeuksien ja akselipainojen kasvun myötä kiristyneet. Toisaalta materiaali itsessään on saattanut radan rasitusympäristön seurauksena muuttua. Näin ollen monilla olemassa olevilla radoilla alusrakennemateriaalin laatu on huomioon otettava tekijä routimis- ja kuormituskestävyysongelmia tarkasteltaessa.

Routa- ja kuormituskestävyysongelmien syyarviointi edellyttää tuekseen alusrakennekerrosten ja pohjamaan laadun arviointia. Pistemäisesti tätä tehdään tyypillisesti kierre- ja painokairauksiin ja mahdollisesti niitä täydentäviin näytetutkimuksiin perustuen. Maatutkamenetelmä mahdollistaa alusrakenteen ja pohjamaan laadun arvioinnin kahdella, luvuissa 5.2 ja 5.3 tarkemmin esiteltävillä, tarkastelutasolla.

Perinteisesti maatutkausta on käytetty pistemäisten tutkimusten tulosten laajentamisessa, jolloin samalla on voitu oleellisesti vähentää pistemäisten tutkimusten määrää. Tällöin pistemäisen tutkimuksen tulos alusrakenne- tai pohjamaamateriaalin laadusta on ulotettu pätemään tietylle yhtäjaksoiselle alueelle, jolla rajapinnalta heijastuvan maatutkasignaalin voimakkuus vastaa tilannetta tutkimuspisteessä. Tällä menetelmällä voidaan tehokkaasti määrittää pohjamaan laadun vaihtumisalueet.

Kehittyneemmällä analysointitasolla maatutkasignaalin taajuussisällöstä voidaan tukikerroksen hienontuneisuuden arviointia (vrt. luku 4.2) vastaten myös suoraan laskea taajuusvastetta profiilimuodossa, jolloin saadaan tietoa eri kerrosten ja materiaalien laadusta. Menettelyä esitellään lähemmin luvussa 5.3.

Molemmilla yllä mainituissa tarkastelutavoissa maatutka mahdollistaa tarkastelua edellyttävän alueen pituuden täsmentämisen ja lisätutkimusten ohjaamisen kiinnostaviin paikkoihin. Maatutkamenetelmän avulla alusrakenteen ja pohjamaan laatu voidaan myös luokitella jatkuvaksi tiedoksi ratalinjalle.

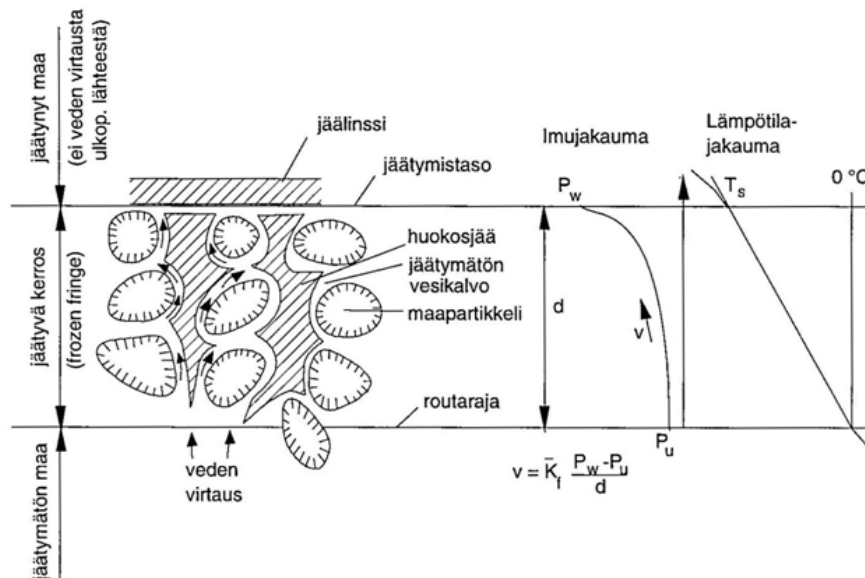
#### 5.1.2 Materiaalien laadun yhteys routimiseen

Maan jäätyminen, eli routaantuminen, aiheuttaa ratarakenteessa raiteen epätasaisuutta, mikäli maa routii jäätyessään. Routimisella ymmärretään routaantumista tai sulamisesta mahdollisesti seuraavia haitallisia ilmiöitä, routanousua ja sulamispehmenemistä.



Routimisprosessin pääasiallinen aiheuttaja on sulasta maasta virtaavan veden synnyttämien jäälinssien muodostuminen jäätymisvyöhykkeessä. Jäälinssien muodostuminen aiheuttaa routaantuvan maan tilavuuden kasvua, joka voidaan havaita radan pinnalla routanousuna. Routiva maa määritellään sellaiseksi, jossa suotuisissa kosteus- ja jäätymisoloissa tapahtuu merkittävää jäälinssien muodostumista (ISSMFE, 1989). Suotuisilla olosuhteilla viitataan siihen tosiasiaan, että routiminen edellyttää routivan maan lisäksi sekä alle  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaa että lisäveden saatavilla oloa.

Routimisteorioista laajimmin hyväksytty sekundaarisen routanousun teoria nojaa siihen, että kaikki vesi maan huokosissa ei jäädy vielä  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa, vaan mahdollistaa ns. osittain jäätyneen kerroksen olemassaolon. Osittain jäätynyt kerros syntyy likimäärin  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  isoterminä vastaavan routarajan ja yleensä muutamia millimetrejä sen kylmemmällä puolella olevan jäälinssin muodostumistason välille (kuva 65). Osittain jäätyneessä vyöhykkeessä vaikuttavan lämpötilagradientin aiheuttama, jäälinssin muodostumistasolle suuntautuva, alipaine sekä maapartikkeleja verhoava jäätymätön vesikalvo mahdollistavat lisäveden virtauksen alapuolisesta sulasta maasta ylöspäin jäälinssin muodostumistasolle. (Nurmikolu, 2005)

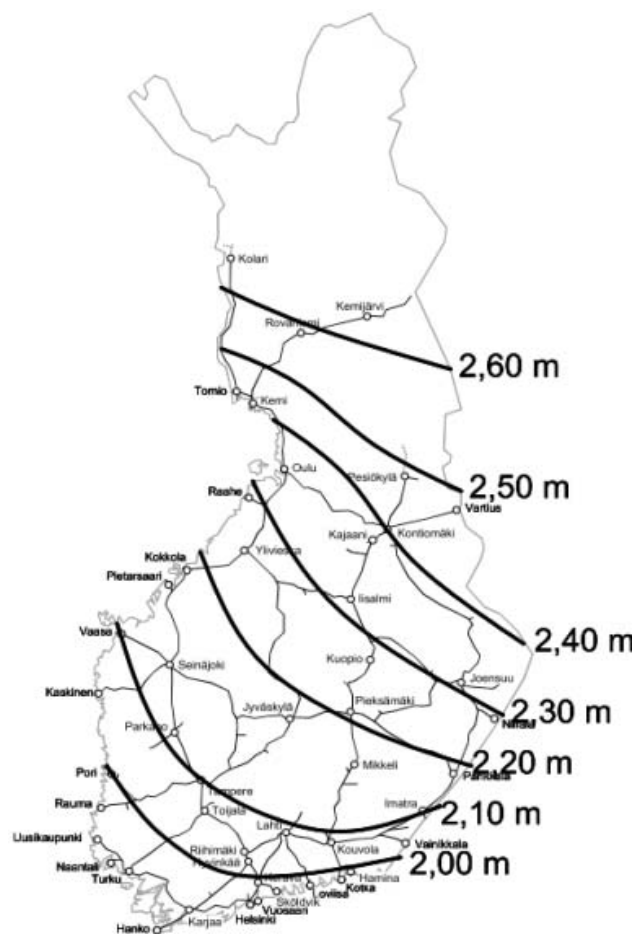


Kuva 65. Segregaatiopotentiaaliteorian mukainen käsitys osittain jäätyneestä vyöhykkeestä (Nurmikolu, 2005).

### 5.1.3 Routasuojaus ja routimisongelmien syyt

Ratarakenteen suunnittelussa raiteen suuren tasaisuusvaatimuksen vuoksi lähtökohtana pidetään rakenteen routimattomuutta. Routivassa rakennekerrosmateriaalissa tämä edellyttäisi materiaalin jäätyminen tai jäätymisvyöhykkeeseen suuntautuvan veden kulun estämistä, joista kumpikaan ei ole ratarakennetta ajatellen käytännössä mahdollinen yleisen tapauksen ratkaisu. Tästä syystä routimisen estämiseksi radan rakennekerrokset rakennetaan routimattomista materiaaleista ja niiden alapuolisen routivan pohjamaan jäätyminen pyritään estämään mitoittamalla rakennekerrosten paksuus riittäväksi (Nurmikolu ja Kolisoja, 2002).

Vaadittu rakennepaksuus rataverkolla riippuu sen maantieteellisestä ja ilmastollisesta sijainnista. Ratahallintokeskuksen (2008) mukaan Etelä-Suomessa uusien routaeristämättömien routimattomien kerrosten minimipaksuus pitäisi olla 2,0–2,2 m Etelä- ja Keski-Suomessa ja 2,6 m Pohjois-Suomessa. Erityisesti vanhoilla rataosuuksilla edellä mainitut rakennepaksuudet eivät täyty ja varsinkin suuren pakkasmäärän omaavina talvina routa etenee routimattomien rakennekerrosten läpi routivaan pohjamaahan ja saa aikaan vakavia routaongelmia kiskon tasolle. Kuvassa 66 on esitetty vaatimukset uusien routaeristämättömien ratojen rakennekerrosten kokonaispaksuuksille. Jos väli- ja eristyskerroksen materiaalina käytetään murskattua kiviainesta, on kuvassa 66 esitettyjä routimattoman radan rakennepaksuuksia kasvatettava 15 %. (Ratahallintokeskus 2008)



Kuva 66. Routimattoman radan rakennekerrosten kokonaispaksuus. Laskenta perustuu ilmastotilastoihin kaudelta 1978–2007 (Ratahallintokeskus, 2008).

Olemassa olevilla radoilla routimisongelmia aiheutuu kuitenkin seuraavista syistä:

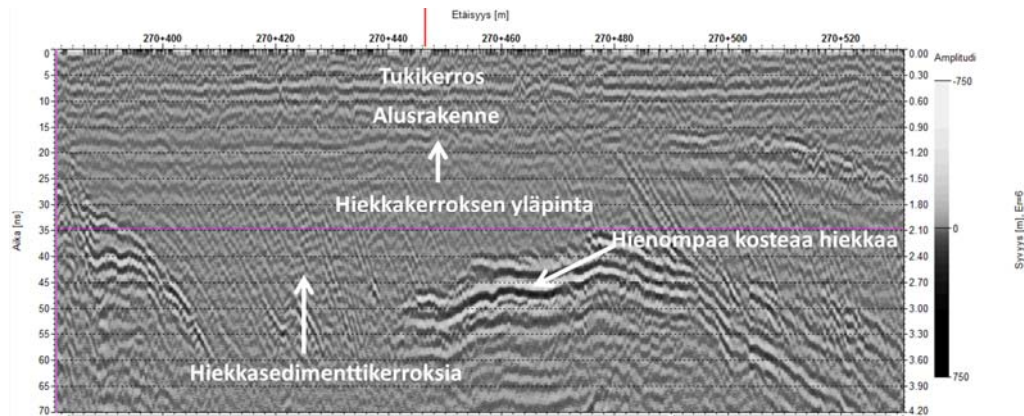
- 1) routimattomien rakennekerrosten paksuus ei ole riittävä estämään routivan pohjamaan jäätymistä tai
- 2) alusrakennekerrokseen (väli- ja eristyskerros) on aikoinaan asennettu routivia hiekka-, sora- ja moreenimateriaaleja tai
- 3) tukikerroksen raidesepeli on hienontunut radassa voimakkaasti ja muuttunut routivaksi.

Rakenteen kuivatuksen ongelmat lisäävät routaongelmia merkittävästi kussakin yllä mainitussa tapauksessa. Ensisijaisesti kuivatusongelmaksi on luettavissa myös ns. paannejään aiheuttamat ongelmat, jotka liittyvät lähinnä kallioleikkauksissa leikkauspohjalle virtaavan veden jäätymiseen, jossa ei ole suoranaisesti kyse routimisilmiöstä. Routimisen ja paantamisen seurauksena päädytään radan lisääntyneeseen kunnossapitotarpeeseen, routakiilauksiin ja pahimmillaan nopeusrajoitusten asettamiseen. Tyypillisesti routaongelmia pyritään helpottamaan käyttämällä lisäroutasuojauksena polystyreenisiä routaeristelevyjä tai ongelmallisimmissa tapauksissa routivan materiaalin massanvaihdon.

## 5.2 Pohjamaan laadun arviointi rajapinta-heijasteen voimakkuudesta

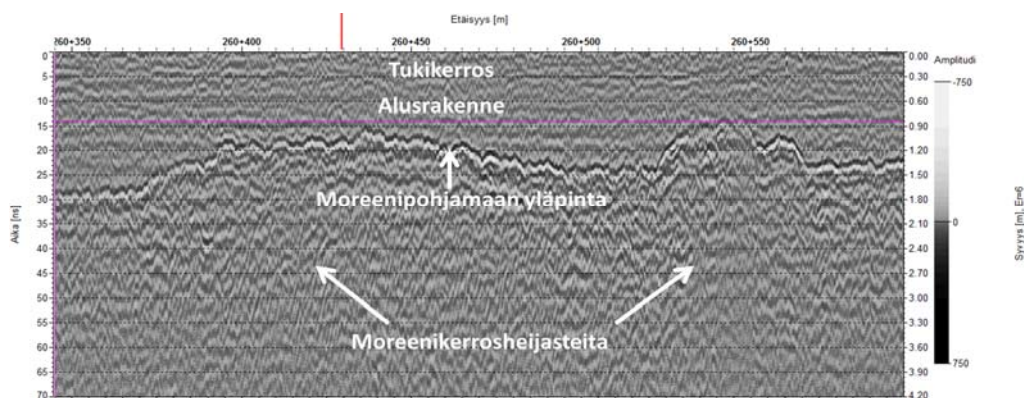
Kerrospaksuustiedon lisäksi maatulka-aineistosta voidaan visuaalisesti arvioida rata-rakenteiden alapuolisen pohjamaan laatua ja merkitä maaperän vaihtuvuusvyöhykkeitä. Yleisimmin maaperän laadun arviointia käytetään pohjamaan routivuuden määrittämisessä. Koska ratapenger on tehty pääosin karkeasta, routimattomasta, vettä hyvin läpäisevästä materiaalista, aiheutuu routimattoman ratarakenteen ja routivan vettä pidättävän pohjamaan rajalle voimakas tutkasignaalin heijaste. Karkearakeisten routimattoman pohjamaan ja ratapenkereen väliin ei synny vastaava voimakasta heijasterajapintaa. Pohjamaasta tulevan heijasteen tekstuuri on ominaista erilaisille pohjamaatyypeille. Maatulalla voidaan erotella karkea- ja hienorakeiset pohjamaat toisistaan sekä havaita erilaiset karkeat hiekkamuodostelmat. Myös kallion pinta voidaan havaita maatulalla.

Kuvassa 67 on esitetty tyypillinen hiekkaisilla pohjamailla esiintyvä heijastekuvio. Ratapenkereen alapinnan sekä pohjamaan rajapinnalle aiheutuu vaimea rajapinta, koska sekä pohjamaan yläpuolella oleva alusrakennekerros ja alapuolinen hiekkakerros omaavan lähes samanlaisen dielektrisyysarvon. Hiekkakerroksesta heijastuu sedimenttirakenteiden heijastekuvioita, joista voidaan päätellä kyseessä oleva hiekkainen maalajikerrostuma. Hiekkakerroksen alla km 270+450 jälkeen voidaan havaita noin 2,4 metrin syvyydellä vahvoja heijasteita, jotka todennäköisimmin aiheutuvat hienomman hiekkakerroksen sitomasta kosteudesta.



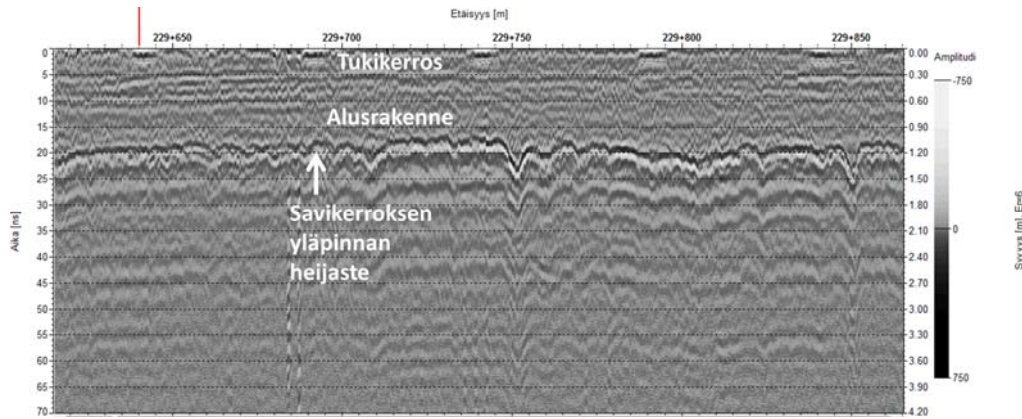
Kuva 67. Maatutkaprofiiliesimerkki hiekkaisen pohjamaan päällä olevasta rata-rakenteesta.

Kuvan 68 esimerkissä noin 0,9-1,3 metriä paksu ratarakenne on routivan silttisen moreenin päällä. Alusrakenteen alapinnan ja moreenin rajapinnalle muodostuu selkeä heijaste niiden dielektrisyyskontrastin johdosta. Pohjamaa voidaan kuitenkin arvioida moreeniksi siitä tulevien sisäisten heijasteiden johdosta. Jos kyseessä olisi hienoaineksisempi materiaali, sisäisiä heijasteita ei olisi havaittavissa.



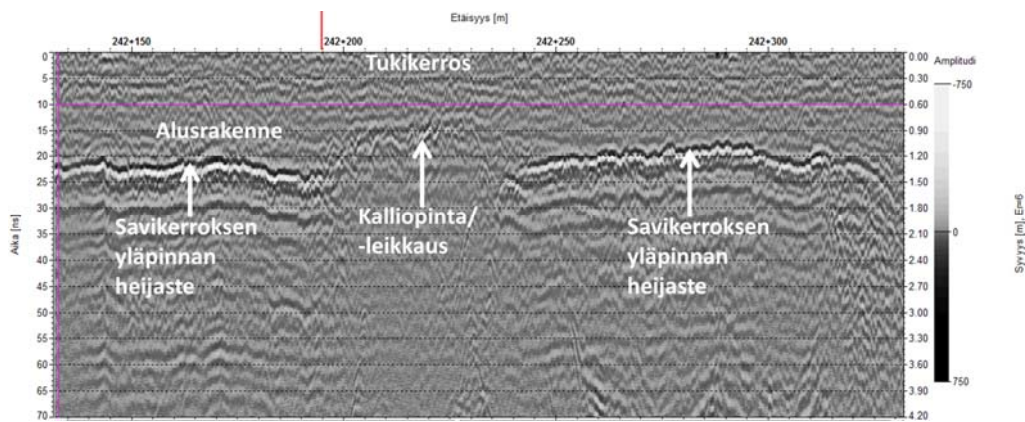
Kuva 68. Maatutkaprofiiliesimerkki moreenipohjamaan päällä olevasta rata-rakenteesta.

Kun kyseessä on hienoainespitoinen silttinen tai savinen pohjamaa, rakennekerrosten alapinnan ja pohjamaan rajapinnalle muodostuu vahva heijaste. Materiaalien välinen ero dielektrisyysyksissä on vieläkin suurempi kuin moreenin ollessa kyseessä. Kuvasta 69 voidaan nähdä ratarakenteen ja niiden alapuolisen savikerroksen rajalle muodostuva rajapintaheijaste noin 1,2 metrin syvyydellä. Hienoainespitoisen routivan pohjamaan tapauksessa tyypillistä on myös se, että saviaines vaimentaa maatutkasignaalin, eikä kerroksen pintaosaa syvemmälle nähdä yleensä käytössä olevilla maatutka-antenneilla.



Kuva 69. Maatutkaprofiliesimerkki savisen pohjamaan päällä olevasta ratarakenteesta.

Kallion aiheuttama heijaste voidaan erottaa pohjamaiden aiheuttamista heijasteista erityisesti kallion sisäisten rakenteiden heijastestruktuurien ansiosta. Kallionpinta voidaan havaita aineistosta luotettavimmin silloin, kun sen pinnalla ei ole isoja lohkeita tai hienoainespitoista materiaalia. Kuvassa 70 voidaan nähdä kalliopintaheijasteen nousevan noin 0,9 metrin syvyyteen profiilin keskivaiheilla. Kuvan alku- ja loppupäässä nähdään savikerroksen aiheuttaman vahvan heijasterajapinnan syvyyden vaihtelevan 1,1–1,4 metrin välillä.



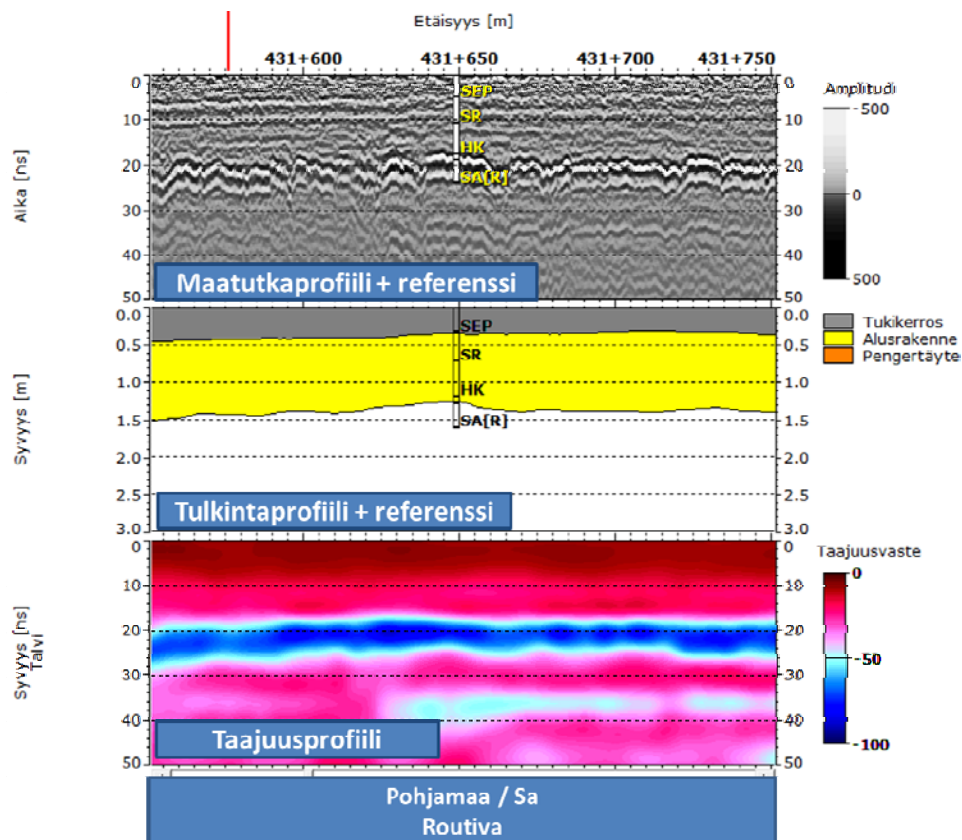
Kuva 70. Maatutkaprofiliesimerkki kalliopintaheijasteesta savialueiden välissä.

### 5.3 Maamateriaalien laadun arviointi maatutka-aineiston taajuussisällöstä

Heijasteprofiilitarkastelun lisäksi maatutka-aineistosta on mahdollista analysoida hienoaines- ja vesipitoisuuteen liittyviä materiaaliominaisuuksia tarkastelemalla maarakenteista heijastuneiden signaalien taajuussisältöä (Silvast et al., 2012). Kun maa-aineksen hienoainespitoisuus kasvaa, se alkaa pidättää vettä ja aineksen dielektrisyys, sähkönjohtokyky sekä routimisherkyys kasvavat. Korkea hienoaines- ja vesipitoisuus vaimentavat korkeat taajuudet maatutkasignaalista ja pidentävät signaalin kulkuaikaa. Signaalin taajuussisältöä analysoimalla voidaan tarkastella eri syvyyksillä olevien materiaalien laatua jatkuvana profiilina.

Maatutkasignaalin taajuussisällön tarkastelun mahdollistamiseksi aikatason mittaukset muunnetaan taajuustasoon Fourier-muunnoksella (vrt. luvut 2.4.2 ja 4.2). Maatutka-aineistolle suoritetaan laskenta ikkunoidulla Fourier-muunnoksella (WFT-Windowed Fourier Transformation), jossa signaali muutetaan taajuustasoon halutun kokoiseksi valittavissa olevalla liukuvalla ikkunalla pituus- ja syvyysuunnassa. Tällöin voidaan tarkastella taajuuskomponentin vastetta ratarakenteessa ja pohjamaassa eri syvyyksillä. Laskennan tuloksena saadaan taajuusprofiili, jossa maatutka-aineisto esitetään taajuuksien voimakkuutta kuvaavana värikoodattuna profiilina. Profiilista on mahdollista havaita esimerkiksi kuivatusongelmia ja kohonneen kosteuspitoisuuden omaavia hienoainespitoisia pohjamaamateriaaleja tai märän alusrakenteen aiheuttamia voimakkaita heijasteita. Seuraavissa esimerkeissä on esitetty eri maalajien vastetta taajuusprofiilissa.

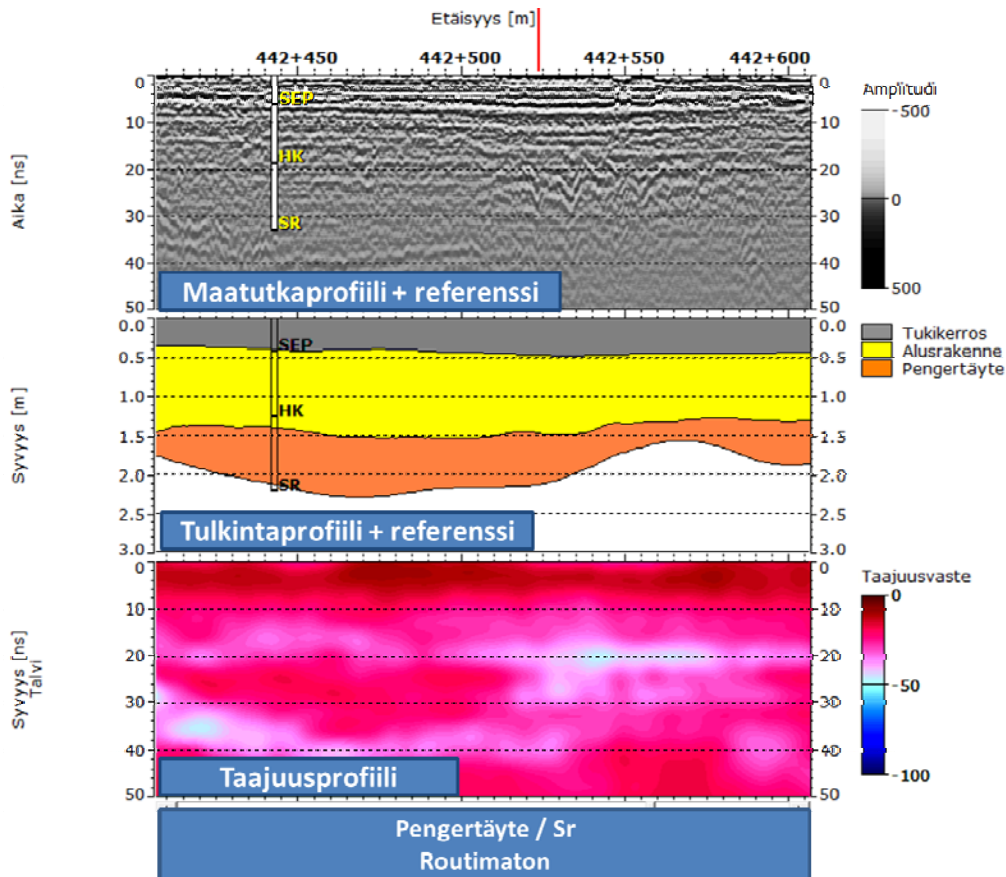
Kuvassa 71 on esitetty maatutka-, tulkinta- ja taajuusprofiili kohteesta, jossa referenssikairauksen sekä maatutkatulkinnan perusteella alusrakenteen alla on routiva savi, joka aiheuttaa maatutkaprofiilissa selkeän voimakkaan rajapintaheijasteen. Vahvan rajapinnan alapuolella ei nähdä signaalin soimisen lisäksi selkeitä heijasteita energian vaimentuessa nopeasti savimaassa. Tulkintaprofiilin alle on laskettu maatutkaprofiilista matalataajuuskomponentin suhteellista osuutta kuvastava taajuusprofiili. Matalataajuisen taajuussisällön heijasteet (siniset värit) kuvaavat vahvaa kontrastia kosteuspitoisuudessa materiaalien välillä. Punaisen värin alueet indikoivat kuivaa rakennetta tai rakennetta jossa signaali on vaimentunut. Taajuusprofiilissa alusrakenteen ja savisen pohjamaan rajapinnalla heijasteen taajuussisältö näkyy paksumana sinisenä kerroksena, jossa matalien taajuuksien määrä on suuri johtuen suuresta dielektrisyys- ja kosteuskontrastista jäätyneen rakenteen ja sulan savimaan välillä.



Kuva 71. Maatutkaprofiili kohteesta, jossa alusrakenteen alapuolinen pohjamaamateriaali on savea.

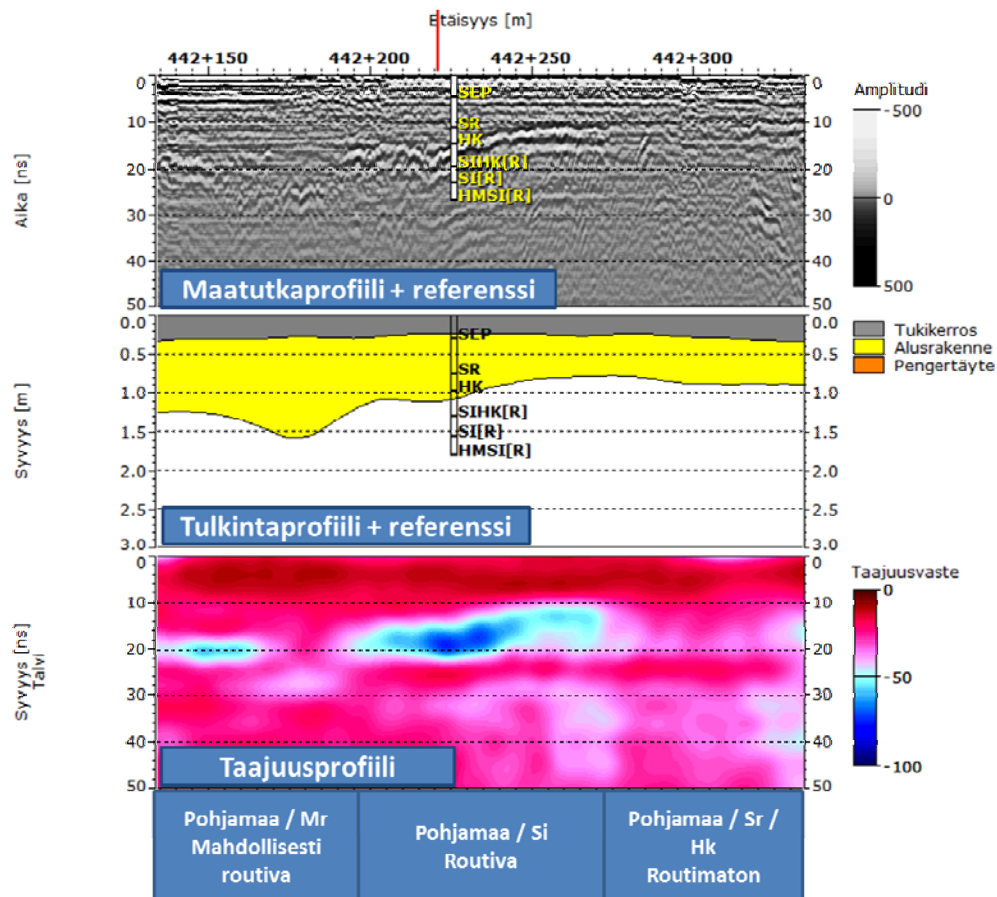


Kuvassa 72 nähdään maatutka-, tulkinta- ja taajuusprofiili, jossa referenssikairauksen ja maatutkatulkinnan perusteella alusrakenteen alapuolinen pengertäyttemateriaali on routimatonta karkeaa soraa. Maatutkaprofiilissa alusrakenteen ja pengertäytteen rajapintaheijaste on vaimea, ja yksittäisiä heijasteita tulee myös karkean pengertäytteen eri korkeustasoilta. Maatutkaprofiilista lasketussa taajuusprofiilissa havaitaan vain vaimeita matalien taajuuksien vasteita, mikä indikoi karkeasta, kuivasta ja routimattomasta materiaalista.



Kuva 72. Maatutkaprofiili kohteesta, jossa alusrakenteen alapuolinen pengertämateriaali on routimatonta soraa.

Kolmannessa esimerkissä, kuvassa 73, on esitetty maatutka-, tulkinta- ja taajuusprofiili kohteesta, jossa pohjamaa vaihtuu alkuosan moreenista siltiksi profiilin keskiosassa. Loppuosassa profiilia pohjamaa on tutkaprofiilin perusteella karkeaa hiekkaa tai soraa. Maatutkaprofiilista lasketussa taajuusprofiilissa havaitaan linjan alussa matalien taajuuksien vasteen kohonneita arvoja moreenijaksolla. Linjan keskiosan silttinen alue aiheuttaa taajuusprofiiliin huomattavasti suurempia matalien taajuuksien vastearvoja, mikä näkyy sinisenä alueena alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnalla. Arvot ovat kuitenkin pienempiä kuin kuvan 71 savipohjamaalla johtuen siltin pienemmästä vesipitoisuudesta ja sähkönjohtavuudesta. Linjan loppuosan karkealla pohjamaalla arvot ovat pieniä eikä taajuusprofiilissa ole huomattavia poikkeamia.



Kuva 73. Maatutkaprofiili kohteesta, jossa alusrakenteen alapuolinen pengeräyte on routimatonta soraa.

Edellisten esimerkkien perusteella voitiin havaita, että eri maamateriaaleilla on toisistaan poikkeava taajuusvaste johtuen niiden dielektrisydestä, sähkönjohtavuudesta ja vesipitoisuudesta. Taajuusvasteen avulla voidaan siten erotella maalajeja toisistaan ja arvioida niiden laatua. Seuraavassa luvussa esitetään esimerkkejä taajuusvaste-tiedon käyttämisestä radan routivuuden tutkimisessa.

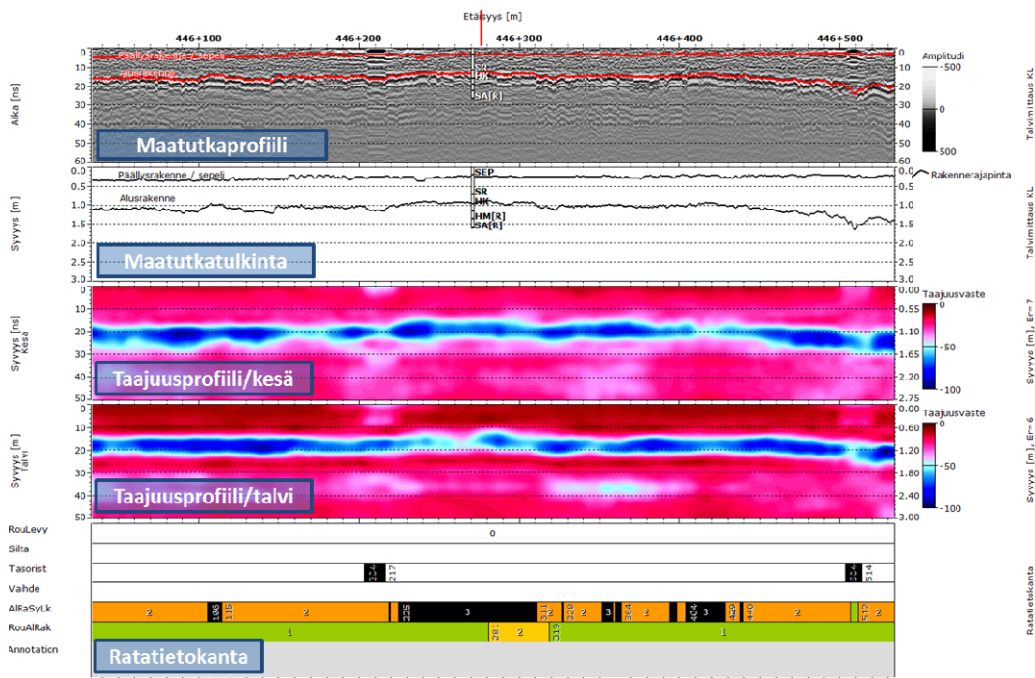
## 5.4 Heijasteen taajuussisällön vuodenaikaisvaihtelun hyödyntäminen routimistutkimuksissa

Rakenteen vuodenaikaisriippuvaista käyttäytymistä, kuten routimista, voidaan tarkastella mittaamalla maatutka-aineistoa maksimiroudan aikaan talvella tai keväällä ja vertailumittauksena sulan maan aikaan kesällä tai syksyllä. Vertailemalla talvi- ja kesämittausprofiileista laskettua taajuusvastetta voidaan jatkuvasta datasta paikallistaa alueet, joilla on talvella kesäaikaa enemmän kosteutta ratapenkereen ja pohjamaan rajapinnalla. Tilanne indikoi routivasta pohjamaasta, jossa jäälinsin muodostuminen on mahdollistunut alapuolisen sulan maan lisäveden ylöspäin virtauksen johdosta. Kesän suuret arvot, joita ei havaita talvella vastaavissa paikoissa, saattavat puolestaan indikoida heikosta kuivatuksesta, mikä ei kuitenkaan ole aiheuttanut routimista. Analyysin mahdollisuuksia selventäen seuraavissa esimerkeissä kuvataan

erilaisten rakenne- ja pohjamaatyypin maatutkatuloksia eri vuodenaikoina mitattuna.

Kuvassa 74 nähdään esimerkki savipohjamaalla kesällä ja talvella mitatusta maatutka-aineistosta, josta on laskettu matalien taajuuksien suhteellista osuutta kuvastavat taajuusvasteprofiilit. Maatutkaprofiilissa nähdään vahva heijaste noin yhden metrin syvyydellä alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnalla. Kesä-aineistosta lasketussa taajuusprofiilissa nähdään suuren matalien taajuuksien vastearvon omaava alue saven yläpinnassa. Samassa kohteessa talvella maksimiroudan aikaan mitatusta aineistosta lasketusta taajuusprofiilista havaitaan suuruudeltaan samanarvoinen matalien taajuuksien vaste pohjamaan yläpinnassa.

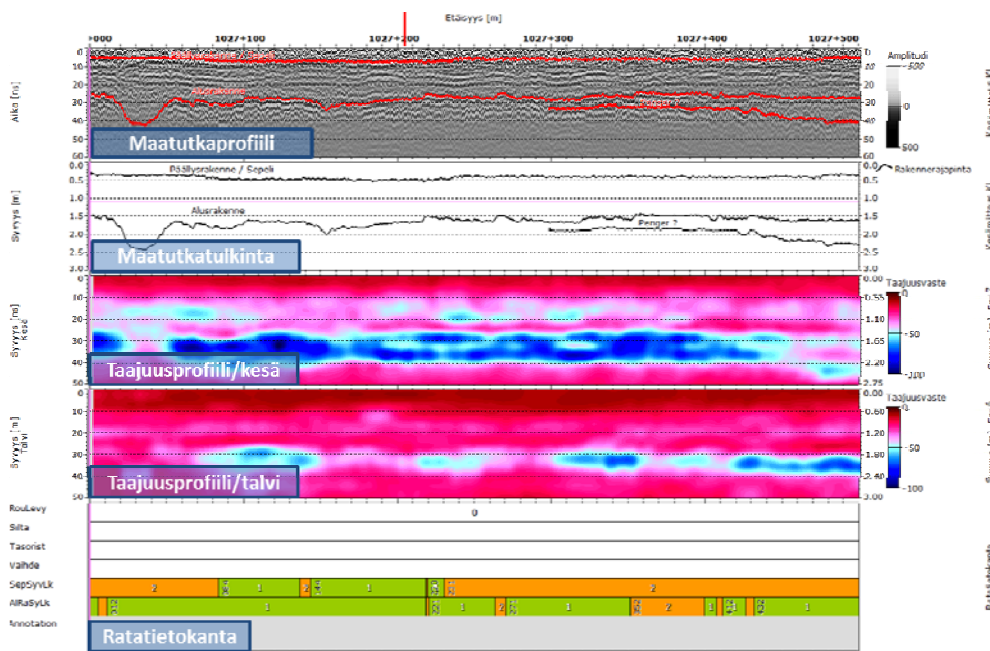
Tulosten perusteella voidaan havaita, että rakenteen rajapinnalle syntyy talvella voimakas matalien taajuuksien heijaste, mutta vuodenaikojen välillä ei ole huomattavaa eroa. Tällainen tulos on ominaista savimailla, jolloin pohjamaa on yleensä vedellä kylästynyttä niin kesällä kuin talvellakin. Alusrakenteen osalta taajuusvastearvot eivät vaihteile kumpunkaan mittausajankohtana, mikä viittaa referenssikairauksen tulosta tukien karkeaan ja routimattomaan alusrakennemateriaaliin.



Kuva 74. Esimerkki savipohjamaalla mitatusta maatutkalinjasta tulkintoihin sekä kesä- ja talviaineistoista lasketuista taajuusprofileista.

Kuva 75 esittää esimerkin siltti- ja turvepohjamaalla olevasta kohteesta, jossa maatutkatulkinnan perusteella rakenteen kokonaispaksuus on yli 1,5 metriä. Alusrakenteen alapuolinen kerros on pelkällä maatutkalla arvioituna mahdollisesti silttiä ja turvetta. Kesällä mitatussa taajuusvasteprofiilissa havaitaan voimakkaita matalien taajuuksien vasteita pohjamaan yläosan syvyydellä ja osin myös alusrakenteen sisällä. Talviaineistossa ei havaita poikkeamia alusrakenteesta ja pohjamaasta tulevat vasteet ovat vähentyneet kesällä mitattuun tulokseen verrattuna muutamissa kohdissa.

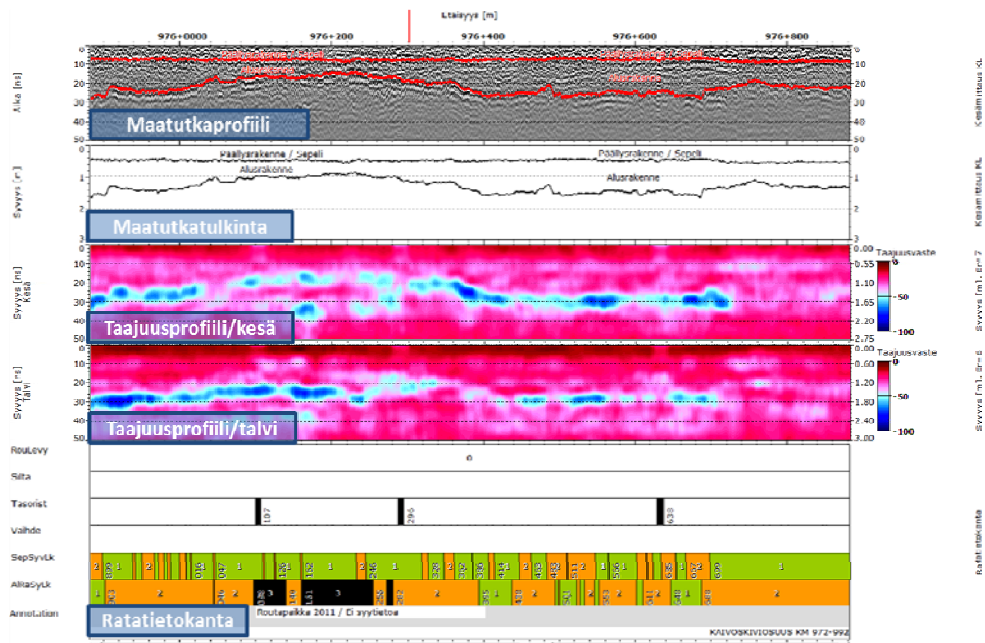
Tulosten perusteella kesällä mitattu aineisto indikoi alusrakenteessa olevan hienoa-ainespitoista materiaalia, joka imee itseensä kosteutta. Pohjamaa on todennäköisesti turvepitoista, kesällä kosteaa ainesta, joka tulosten perusteella on kuivempaa talvella. Talviprofiililla nähtävät siniset korkean taajuusvasteen alueet kuitenkin kuvastavat vettä olevan saatavilla myös talvella mahdollistaen routimisen.



Kuva 75. Esimerkki siltti- ja turvepohjamaalla mitatusta maatutkalinjasta tulkittoineen sekä kesä- ja talviaineistoista lasketuista taajuusprofileista.

Moreenimailla routaraja voidaan yleensä havaita maatutkan talviaineistoon muodostuvana vahvana rajapintana, joka kesällä mitatussa aineistossa ei ole yhtä selvästi havaittava. Kuvassa 76 nähdään esimerkki routapaikkakohteessa moreenialueella mitatusta maatutkaprofiilista, jossa rakenteiden kokonaispaksuus vaihtelee 0,9–1,5 metrin välillä. Maatutkaheijaste alusrakenteen alapinnassa on suhteellisen vahva, mutta myös rajapinnan alta nähdään heijasteita, mikä viittaa moreenipohjamaahan. Profiilin loppuosassa alusrakenteen alapinta on heikosti havaittavissa, mikä indikoi karkeasta pohjamaasta rakenteiden alla.

Kuvan 76 taajuusprofiilia tarkasteltaessa voidaan nähdä kesäaineistossa jaksoja, joissa taajuusvasteen arvot ovat nousseet, mutta talvella mitatun aineiston taajuusprofiilissa vastaavien kohtien arvot ovat varsinkin linjan alkupuolella yhä kasvaneet ja muodostaneet jatkuvan suuren taajuusvasteen alueen alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnalle. Linjan keskiosan jälkeen talviaineistossa havaitaan matalampi kohonnut taajuusvasteen alue, joka häviää linjan lopussa pohjamaan muuttuessa routimattomaksi. Alusrakenteen osalta tulokset osoittavat sen laadun olevan kunnossa. Kohteen routapaikalle ei ole määritetty syytä, mutta maatutkaluotaustulosten perusteella routimisen syyksi voidaan olettaa liian ohut rakennepaksuus routivalla pohjamaalla.

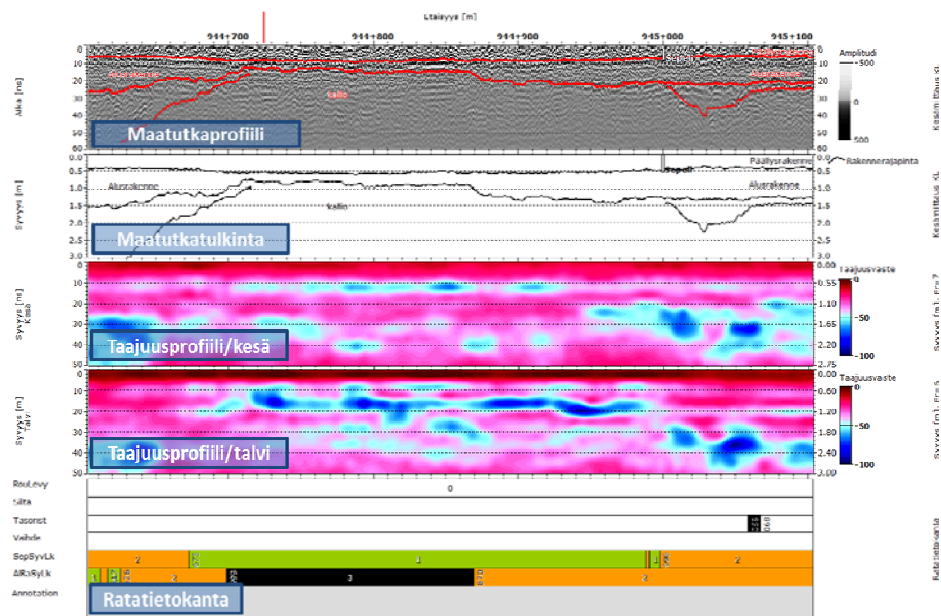


Kuva 76. Esimerkki taajuusvastetarkastelusta routapaikkakohteessa moreenipohjamaalla.

Leikkauspohjalle muodostuva paannejää aiheuttaa routaongelmia erityisesti matalissa kallioleikkauksissa, joissa kuivatuksen toiminnassa on ongelmia. Paantavat kallioleikkaukset voidaan havaita vertaamalla kesällä ja talvella mitattuja maatulka-aineistojen taajuusprofiileja toisiinsa. Kuvan 77 esimerkissä nähdään maatulka-profiili, jossa rakenteet alkavat penkereltä jatkuen kallioleikkaukseen ja loppuen jälleen pengerrakenteelle. Rakennekerrosten kokonaispaksuus vaihtelee 0,7–1,5 metrin välillä, ollen ohuinta kallioleikkauksen kohdalla.

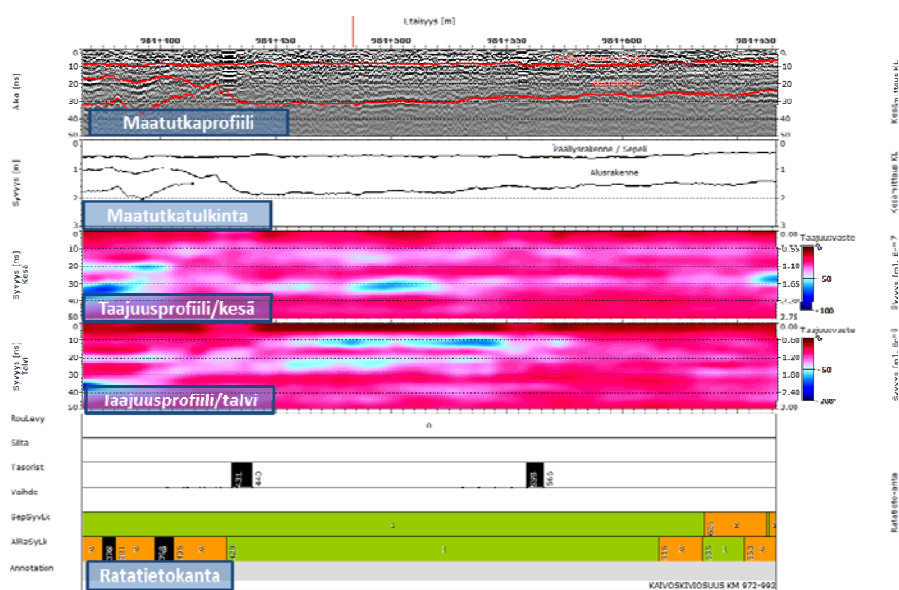
Taajuusprofiileita tarkasteltaessa voidaan kesäaineistossa kallioleikkauksen kohdalla havaita vain hieman kohonneita taajuusvastearvoja johtuen mahdollisesti jauhautuneen tukikerroksen sitomasta kosteudesta ja kallion päällä olevasta vedestä. Talviaineistosta kallion pinnan tasolla nähdään voimakas matalien taajuuksien vaste, mikä viittaa kallion pintaan syntyvään paannejäähän. Myös tukikerroksen alapinnan tasolla nähdään routimiseen viittaavia poikkeamia talviaineistossa.





Kuva 77. Esimerkki taajuusvastetarkastelusta paantavassa kalliroleikkauskohteessa.

Routiva alusrakenne aiheuttaa routaongelmia myös leudompina talvina. Alusrakenteeltaan heikkolaatuiset kohteet voidaan kunnostaa lähinnä vain massanvaihdolla. Toimenpiteen kustannusvaikutusten vuoksi ongelmakohteiden tarkan sijainnin ja ulottumisen määrittäminen on tärkeää. Kuvassa 78 on esitetty esimerkkinäkymä kohteesta, jossa rakennepaksuus maatutkan perusteella on noin 1,0–1,8 metriä. Linjan keskivälillä tasoristeysten välisellä alueella nähdään talviaineistossa vahva heijaste-alue alusrakenteen syvyydellä 0,6–1,0 metrissä. Vastaavaa kohonnuttua taajuusvasteen aluetta ei havaita kesäaineistossa. Tulokset indikoivat, että alusrakenne on routivaa ja saa lisävettä talvella alemmasta kerroksesta muodostaen jäälänssin alusrakennekerrokseen.

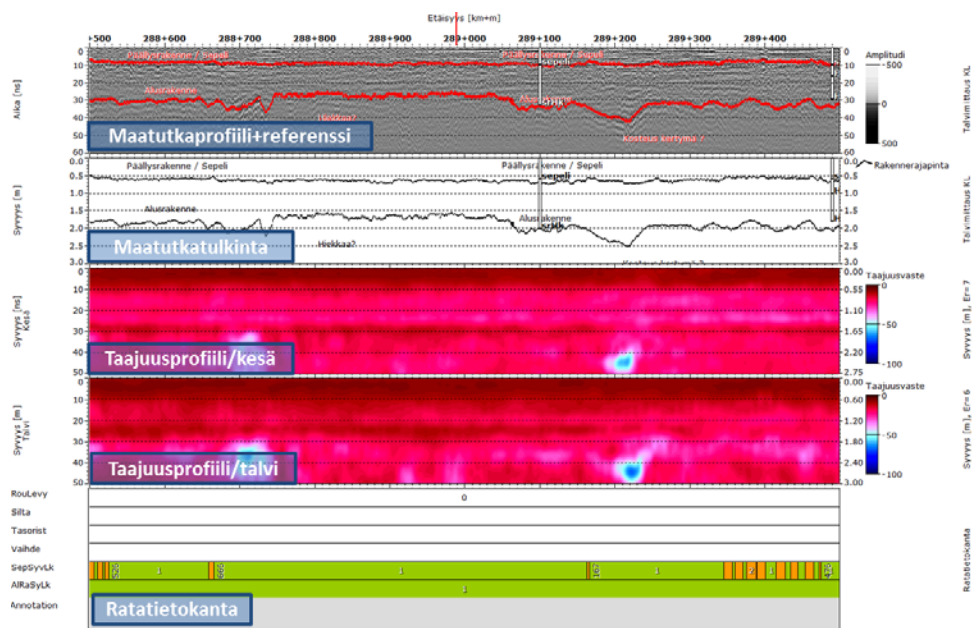


Kuva 78. Esimerkki taajuusvastetarkastelusta routivassa alusrakenteessa.



Kohteissa, joissa on toimiva kuivatus ja alusrakenne sekä pohjamaa ovat routimattomia, taajuusvasteessa ei tällöin aiheudu poikkeamia. Hyvälaatuiset jaksot voidaan havaita alueina, joissa ei tapahdu muutoksia kesä- ja talviaineiston välillä eikä niissä esiinny vahvoja heijasteita. Kuvassa 79 on esitetty esimerkki hyväkuntoisesta rataosuudesta routimattomalla hiekkaisella pohjamaalla. Kuvasta nähdään selkeät rajapinnat maatulka-profiilissa kokonaisrakennepaksuuden vaihdellessa 1,6–2,5 metrin välillä.

Kesä- ja talviaineistojen taajuusprofiileita toisiinsa verrattaessa voidaan havaita, että niiden välillä ei ole huomattavaa eroa ja molempien profiilien taajuusvasteiden arvot ovat pieniä. Tulosten perusteella kohteen alusrakenne sekä pohjamaa ovat routimattomia ja kohteen kuivatus on hyvin toimiva. Siniset poikkeama-alueet taajuusprofiileilla johtuvat rumpujen aiheuttamista heijasteita.



Kuva 79. Esimerkki taajuusvastetarkastelusta routimattomassa kohteessa.

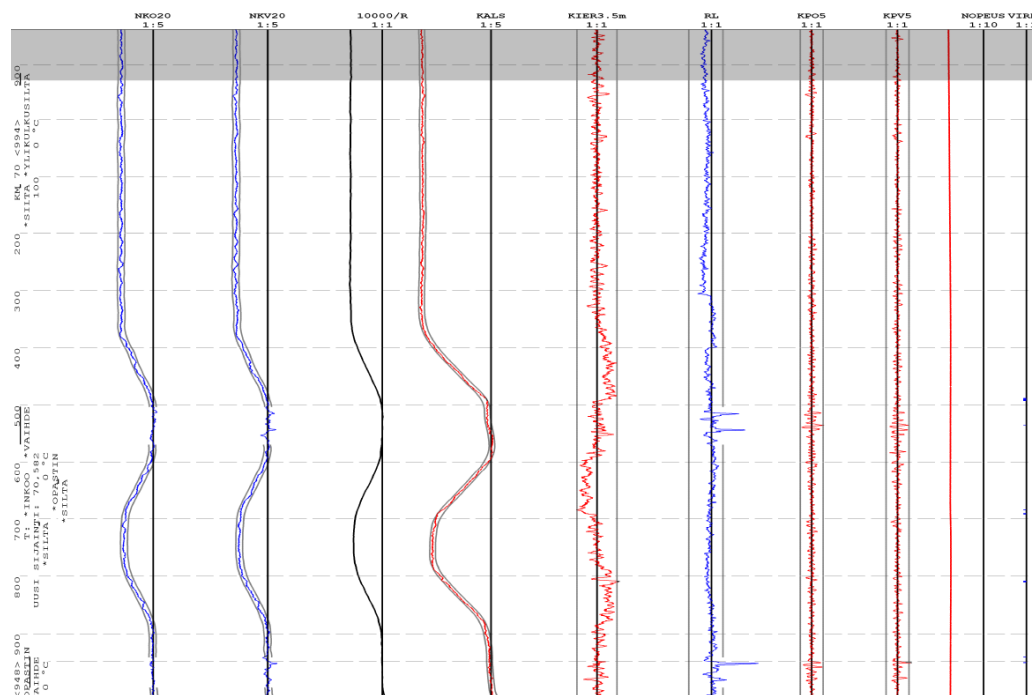
Jos aineistoon yhdistettäisiin esimerkiksi korkeuspoikkeama-aineistoa eri vuoden-aikoina mitatusta raidegeometriasta, voitaisiin tutkia heijastuuko ongelma kiskojen tasolle. Seuraavassa luvussa esitellään yhdistetyn aineiston käsittelyn esimerkkejä ja mahdollisuuksia.

## 6 Maatutkaustiedon integrointi muuhun tietoaaineistoon

### 6.1 Rekisteritietojen yhdistäminen

Ratatietokantojen esittäminen maatutka-aineiston ja muun radalta mitatun aineiston tulkinnan yhteydessä antaa arvokasta lisätietoa ratarakenteen ongelmien aiheuttajien arviointiin. Aiempien lukujen esimerkeissä maatutka-aineistoa on käsitelty yhdessä muun muassa ratavideon, GPS:n, kairatietojen ja laserkeilausaineiston kanssa. Myös muuta radalta mitattua aineistoa voidaan esittää profililla. Seuraavassa kuvataan esimerkkejä erilaisten rekisterien ja tietokantojen yhdistetystä tarkastelusta.

Radantarkastusmittausaineisto antaa tietoa radan toiminnallisesta kunnosta. Radan tarkastusvaunulla tarkastetaan muun muassa raiteen asentovirheitä. Radantarkastusaineisto tarkastellaan perinteisesti tulostuksena (kuva 80) ja virhelistauksina (kuva 81), joista nähdään eri mittasuureiden tulokset ja korostetusti niiden virherajat ylittävät poikkeamat. Radantarkastusaineiston perusteella voidaan paikantaa radan ongelmallisesti käyttäytyvät jaksot, mutta siitä ei yleensä kuitenkaan saada selville ongelman rakenteellista aiheuttajaa.



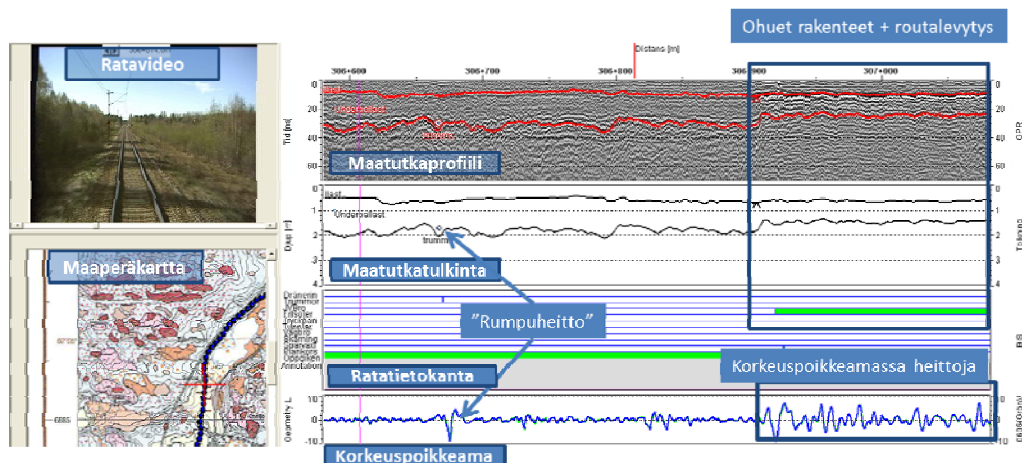
Kuva 80. Esimerkki VR-Track Oy:n radantarkastusvaunun tuottamasta tiedosta käyrätulosteena.

RDE	-ALOITUS- KM M	-LOPETUS- KM M	PITUUS M	SUURE	MAKSIMI ARVO	VIRHE SIJAINTI	KP-TASO TARK	MIT	VIRHELUOKKA
TQI	(2.00)	KALGr	KPV5	KPO5	NKV20r	NKO20r	YHT.		
0	200	3.14	1.32	1.10	3.73	4.08	13.36		
200	400	2.58	1.10	1.04	3.06	2.93	10.71		
400	600	3.38	1.49	1.30	4.32	4.64	15.12		
600	800	2.99	1.09	1.21	2.19	2.35	9.84		
800	995	1.07	1.02	0.96	1.51	1.59	6.15		
69,0	70,0	2.78	1.22	1.13	3.13	3.31	11.57		
1		70, 114	ALKU* >>> SILTA						
1		70, 120	LOPPU* >>> SILTA ( 6)						
1	70, 492	70, 495	3 KALS		-7	70, 492	1A	2	D
1		70, 503	ALKU* >>> VAIHDE						
1	70, 534	70, 535	1 KPV		-5	70, 535	1A	1	D
1	70, 534	70, 535	1 KPO		-6	70, 535	1A	2	D
1	70, 537	70, 538	1 KPO		4	70, 538	1A	1	D
1		70, 569	LOPPU* >>> VAIHDE ( 66)						
1		70, 582	UUSI SIJAINTI: 70,582						
1		70, 584	* >>> OPASTIN						
1		70, 620	T: *INKOO						
1		70, 631	ALKU* >>> SILTA						
1		70, 639	LOPPU* >>> SILTA ( 8)						
1		70, 706	ALKU* >>> SILTA						
1		70, 712	LOPPU* >>> SILTA ( 6)						
1	70, 805	70, 806	1 KPO		-5	70, 806	1A	1	D
1	70, 808	70, 810	3 KIER		-8	70, 808	1A	2	D
1	70, 847	70, 847	0 KIER		-7	70, 847	1A	1	D
1		70, 923	* >>> OPASTIN						
1		70, 941	ALKU* >>> VAIHDE						
1	70, 940	70, 941	0 NKV20		7	70, 940	1A	2	D
1		70, 948	KM 71 <948>						

Kuva 81. Esimerkki VR-Track Oy:n radantarkastusvaunun tuottamasta tiedosta virhelistausmuodossa.

Maatutka-aineiston ja radantarkastustiedon, erityisesti korkeuspoikkeamatiedon, yhdistetty tarkastelu antaa arvokasta tietoa ongelmien aiheuttajista ja mahdollistaa täsmällisen korjaussuunnittelun ongelmien poistamiseksi. Korkeuspoikkeama ilmentää ongelmia radan pystysuuntaisessa pysyvyydessä ja poikkeavat tulokset kertovat yleensä tukikerroksen ongelmista, vuodenaikaisriippuvaisista ongelmista tai muulla tavalla puutteellisesti toimivista rakenteista.

Kuvassa 82 on esitetty esimerkki Ruotsissa tehdystä mittauksesta, jossa maatutka-profiilista nähdään rakennekerrokset, ratatietokannassa on esitetty ratarekisterien paikkatietoa, ja alimpana on yksittäisen mittauksen korkeuspoikkeama-aineisto. Profiilin alkujaksolla nähdään yksittäinen korkeuspoikkeaman poikkeava arvo, joka voidaan maatutkan perusteella välittömästi yhdistää radan alittavaan rumpuun liittyväksi. Profiilin loppuosassa nähdään selkeästi epävakaa jakso, johon maatutka-luotauksen perusteella selitykseksi voidaan todeta kerrospaksuuden oheneminen pehmeällä pohjamaalla sekä mahdollisesti vanha huonosti toimiva routalevytys. Myös ratavideo antaa tärkeää tietoa kunnossapitotoimenpiteiden määrittämiseksi ja esimerkiksi kuivatuksen kunnon arvioimiseksi. Maaperäkartan perusteella voidaan havaita muun muassa radan lähistöllä oleva pehmeiköt ja turvealueet.



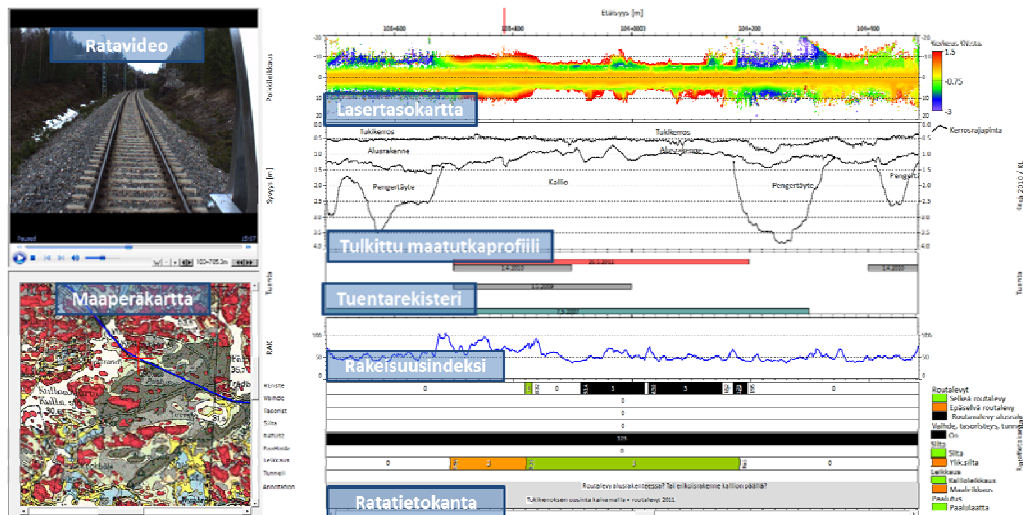
Kuva 82. Esimerkki maatutkan ja ratageometria-aineiston yhteistarkastelusta.

Suunniteltaessa radan kunnossapitoa on oleellista huomioida kohteessa aiemmin tehdyt kunnossapitotoimenpiteet sekä muu rakenteiden historiatieto. Yleensä tietoja tarkastellaan erillisillä sovelluksilla tai taulukkomuodossa (kuva 83), jolloin aineiston liittäminen muuhun tietoon ja kunnossapitotoimenpiteiden toistuvuuden tarkastelu on hankalaa.

VAIHT.TUK. P&T 08-16 SNA (855)	3113	20120801	40	RDM	0811+0490	0811+0530	531
VAIHT.TUK. P&T 08-16 SNA (855)	3113	20111101	140	RDM	0760+0650	0760+0720	531
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20121001	600	RDM	0551+0480	0556+0960	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20121001	710	RDM	0573+0620	0578+0400	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20121001	910	RDM	0589+0000	0612+0520	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20121001	1 400	RDM	0617+0000	0618+0400	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20121001	2 140	RDM	0619+0260	0627+0000	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20121001	2 200	RDM	0627+0000	0633+0000	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20111001	520	RDM	0622+0750	0623+0820	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20111001	1 300	RDM	0575+0400	0618+0760	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20111001	1 530	RDM	0628+0780	0616+0320	005
RAIT.TUK. P&T 09-16 CSM (830)	3116	20111001	1 370	RDM	0633+0560	0630+0380	005

Kuva 83. Esimerkki raiteentuentakoneen tallennusrekisteristä.

Kun kunnossapitotiedot esitetään profiililla muiden tietojen kanssa samanaikaisesti, voidaan esimerkiksi tuennan toistuvat ongelmapaikat havaita ja arvioida niiden mahdollinen aiheuttaja. Tällöin kohteeseen on mahdollista suunnitella korjaustoimenpide, jolla toistuva ongelma olisi mahdollista poistaa. Kuvassa 84 on esitetty esimerkki, jossa mittausaineistojen lisäksi tarkastellaan kohteessa eri vuosina tehtyjen tuentojen perusteella laadittua tuentarekisteriä. Tuentarekisterin perusteella nähdään toistuvaa tuentaa vaativa jakso, joka havaitaan kohteessa olevan kallioleikkauksen alueella, jossa on ohuet rakennekerrokset. Rakeisuusindeksiärvon perusteella tukikerros on toistuvaa tuentaa vaativalla alueella huonolaatuista. Nämä tiedot yhdessä tarjoavat mahdollisuuden tehokkaaseen korjaustoimenpiteen valintaan.



Kuva 84. Esimerkki mittausaineiston ja tuentatiedon yhdistetystä tarkastelusta.

Kiskovikatietoja ylläpidetään ja seurataan kiskovikojen hallintaraportissa sekä kiskovikarekisterissä. Tiedot kerätään kunnossapitäjien ilmoitusten perusteella. Tuloksena saadaan kuvan 85 esimerkin mukaisia kiskovikataulukkoja, joita käytetään muun muassa korjaussuunnittelun lähtötietona.

#### Korjaamattomat vikaluokkien 1, 2/1 ja 2 kiskoviat

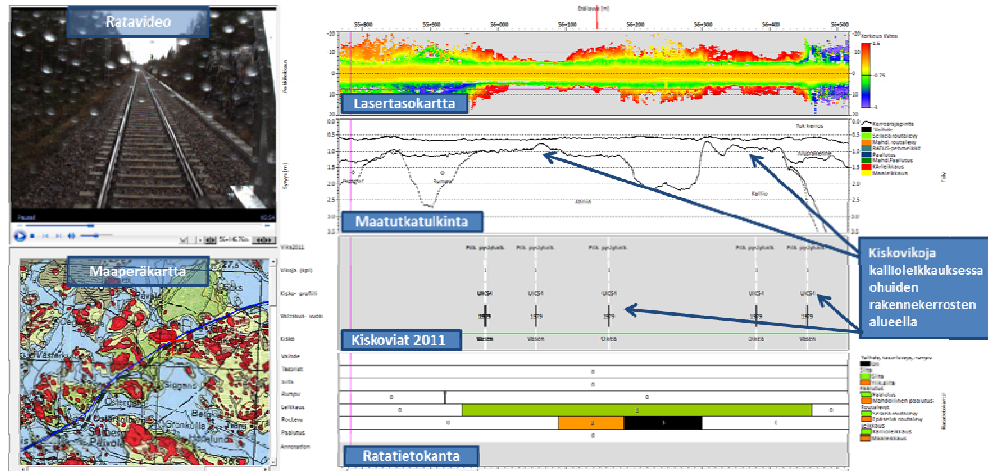
Sijainti km	Kisko	Valmistaja	Kisko-laatu	Valssaus-vuosi	Kisko-profiili	Viat (kpl)	Vika lk	UIC-vika	Havainto Pvm
0038+0961	Oikea	ILVA,LUCCHINI	900A	1996	UIC60	3	2	224	17.9.2012
0048+0060	Vasen	IMATRA (OVAKO)	900A	1985	UIC54	1	2	213	20.9.2012
0049+0700	Oikea	IMATRA (OVAKO)	900A	1984	UIC54	2	2	224	18.9.2012
0067+0750	Oikea	ILVA,LUCCHINI	R260	1997	60E1	2	2	224	20.9.2012
0076+0343	Oikea	IMATRA (OVAKO)	R220	1981	UIC54	1	2	213	24.9.2012
0084+0994	Vasen	TZ	900A	1995	UIC54	1	2	2211	25.9.2012
0100+0324	Oikea	IMATRA (OVAKO)	R220	1987	UIC54	1	2/1	224	27.9.2012
0100+0324	Vasen	IMATRA (OVAKO)	R220	1987	UIC54	1	2/1	224	27.9.2012
0100+0324	Oikea	IMATRA (OVAKO)	R220	1987	UIC54	1	2	224	27.9.2012
0100+0324	Vasen	IMATRA (OVAKO)	R220	1987	UIC54	1	2	224	27.9.2012
0101+0016	Vasen	IMATRA (OVAKO)	R220	1986	UIC54	1	2	224	27.9.2012
0116+0054	Vasen	ENSIDESA	R260	2011	60E1	1	2/1	301	28.9.2012
0121+0396	Vasen	ENSIDESA	R260	2011	60E1	1	2	421	28.9.2012
0085+0780	Vasen	IMATRA (OVAKO)	R220	1966	UIC54	1	2	213	25.9.2012
0135+0539	Oikea	BRITISH STEEL	900A	1992	UIC60	1	2	224	18.10.2012
0135+0800	Vasen	BRITISH STEEL	900A	1992	UIC60	1	2	224	18.10.2012

Kuva 85. Esimerkki kiskovikarekisterin vikataulukosta. (Liikennevirasto, 2012).

Esittämällä kiskovika-aineisto muun mittausaineiston kanssa samassa näkymässä voidaan arvioida mahdollisia itse kiskosta riippumattomia vikojen aiheuttajia. Kuvan 86 esimerkissä on tulosprofiili, jossa on esitetty lasertasokartta, maotutkatulkinta, kiskovikatulokset vuodelta 2011 sekä ratatietokanta ratavideon ja maaperäkartan



kanssa yhteisnäkymänä. Tulosprofiilista nähdään useiden samaa tyyppiä olevien kiskovikojen keskittyvän kallioleikkauksen jaksolle, mikä tieto saattaa auttaa vian syy-arvioinnissa.



Kuva 86. Esimerkki kiskovikarekisterin esittämisestä yhdistettynä näkymänä muiden mittaustietojen kanssa.

Kunnossapidon havaintotiedot esitetään tyypillisesti kuvan 87 esimerkin mukaisina sijaintilistoina eri ongelmille. Kuvassa on esitetty kunnossapitäjän tarkastamallaan osuudella huomioimat kurapaikkojen sijainnit. Kurapaikka syntyy yleensä sateisena aikana rakenteiden epäjatkuvuuskohdassa, jossa on ennestään hienontunut ja siten vedenläpäisevyydeltään heikentynyt tukikerros ratapölkyn alapuolella. Tällöin hieno-aines pääsee liikkumaan ainoastaan pintaa kohti ja dynaaminen junakuorma pump-paa liettyneen hienoaineksen tukikerroksen yläosaan. Hienoaineksen pumppautuminen on suhteellisen harvinainen ilmiö Suomen rataverkolla, mutta pumppautumiskohteita on havaittu ikääntyneen tukikerroksen radoilla. Kurapaikkojen ilmaantuminen voi aiheuttaa tukikerroksen kantavuuden heikkenemistä ja lisääntynyttä tukemistarvetta.

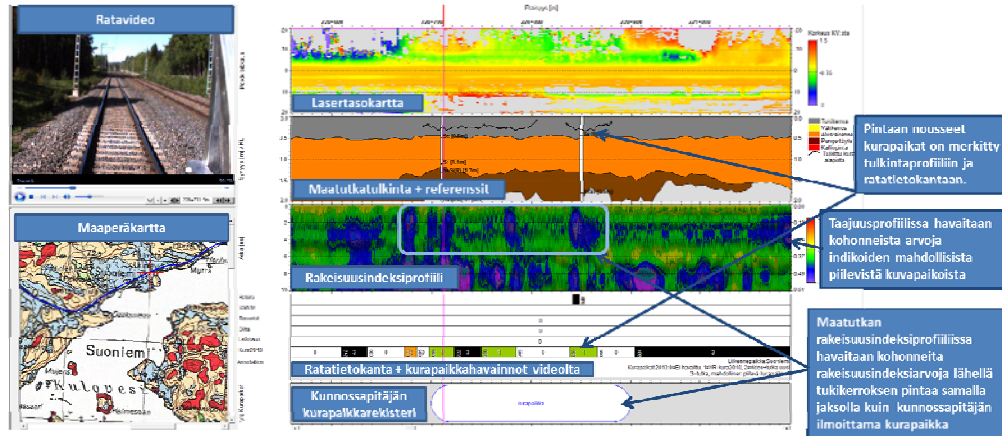
Pahimpia alueita, ns. "kurapaikkoja" ovat: km 202+100–202+300, 202+600–202+800, 203+700–203+800, 204+200–204+300, 208+150–208+200, 214+600–214+800, 218+100–218+200, 220+700–220+900, 229+200–229+600, 231+500–231+900, 234+000–234+400, 234+500–234+800, 235+900–236+100, 240+450–240+600, 241+750–241+850, 243+600–243+900, 244+000–244+500 (useita eri kohteita tällä välillä), 249+600–249+700, 272+500–272+700, 274+850–275+100, 277+400–277+500.

Kuva 87. Ote kunnossapitäjän raportista kurapaikkojen esiintymisestä tarkastetulla rataosuudella.

Kurapaikkojen havainnoiminen jo ennen kuin ne ilmestyvät tukikerroksen pinnalle sekä jo syntyneiden kohteiden kartoitus voidaan tehdä tehokkaasta maatutkan ja ratavideon sekä kunnossapitorekisterien yhdistetyn tarkastelun avulla. Kuvassa 88 on esitetty esimerkkiprofiili rataosuudelta, jolla on kunnossapitäjän raportin mukaan havaittu useita kohteita, joissa hienoaines on pumppautunut tukikerroksen pintaan. Maatutkalla hienoainespitoainen tukikerros voidaan nähdä värikoodatusta taajuusprofiilista, joka on koostettu rakeisuusindeksilaskennoista (vrt. luku 4.3) usealta eri syvyydeltä. Siniset alueet indikoivat kohonneesta rakeisuusluvusta ja hienoaineksesta. Samoilla kohdilla nähdään myös videolla hienoaineksen aiheuttamaa harmaata ainesta tukikerroksessa. Tulosprofiilin alku- ja loppuosissa nähdään myös mahdolli-

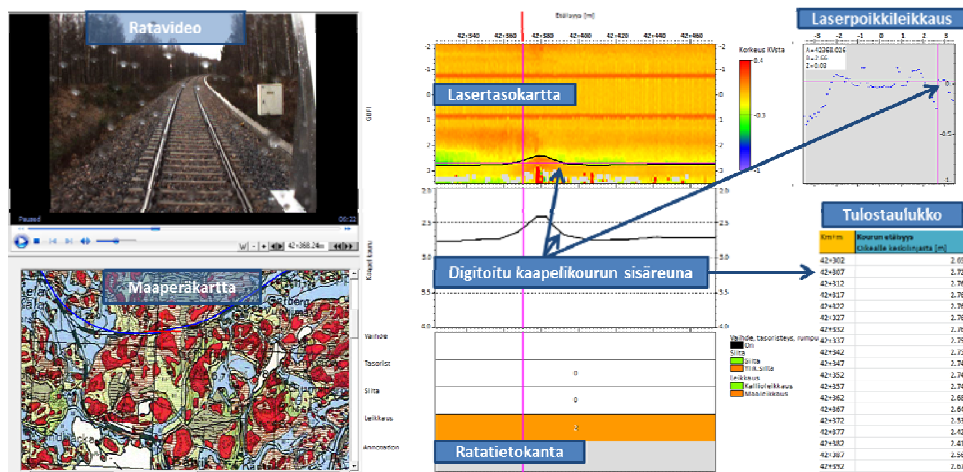


sia piileviä kurapaikkoja, jotka eivät ole vielä nousseet tukikerroksen pintaan. Saatuja tietoja yhdistäen kohteen korjaustoimenpiteiden laajuuden ja tyyppin määrittäminen tehostuu.



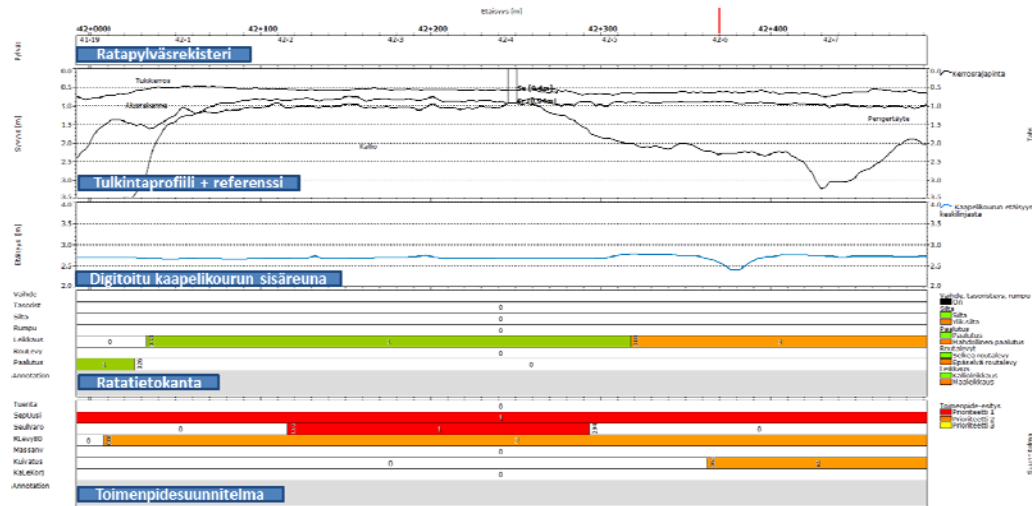
Kuva 88. Esimerkki pumppautuneen hienoaineksen havaitsemisesta maatutkan rakeisuusprofiilista, ratavideosta ja kunnossapitäjän kirjauksista. Jauhautuneet alueet näkyvät sinisinä alueina maatutkasta lasketusta rakeisuusprofiilista. Videolla näkyy myös pumppautunut alue kohdassa km 694+955. Taajuusprofiilin alle on lisätty kunnossapitäjän havainnoimat kurapaikat kesä-lä 2010.

Jatkuvana mitattua tietoa voidaan myös jatkojalostaa muuhun suunnittelun käyttöön soveltuvaksi. Esimerkiksi laserkeilausaineistoa voidaan käyttää rataympäristön havainnoinnin lisäksi myös esimerkiksi baliisien ja muiden ratalaitteiden sijaintien määrittämiseen. Ratatöitä suunniteltaessa erityisesti tiedot työalueella siirtoa edellyttävistä laitteista ja rakenteista ovat tärkeitä, jotta niihin voidaan varautua ennalta. Kuvassa 89 nähdään esimerkki tukikerroksen puhdistustyön suunnittelua varten tehdystä radan vieressä sijaitsevan kaapelikourun paikantamisesta digitoimalla sen sijainti laserkeilausaineistosta.



Kuva 89. Esimerkki kaapelikourun paikannuksesta laserkeilausaineiston avulla.

Edellä esitetty digitoitu tieto voidaan esittää esimerkiksi kuvan 90 mukaisessa toimenpidesuunnitelmaprofiilissa, jolloin maastotöiden aikana voidaan varautua tarvittaessa kourun siirtoon. Ratalaitteiden sijainnit saadaan tulostettu linjaksi profiilille tai listoiksi tulevaa käyttöä varten.

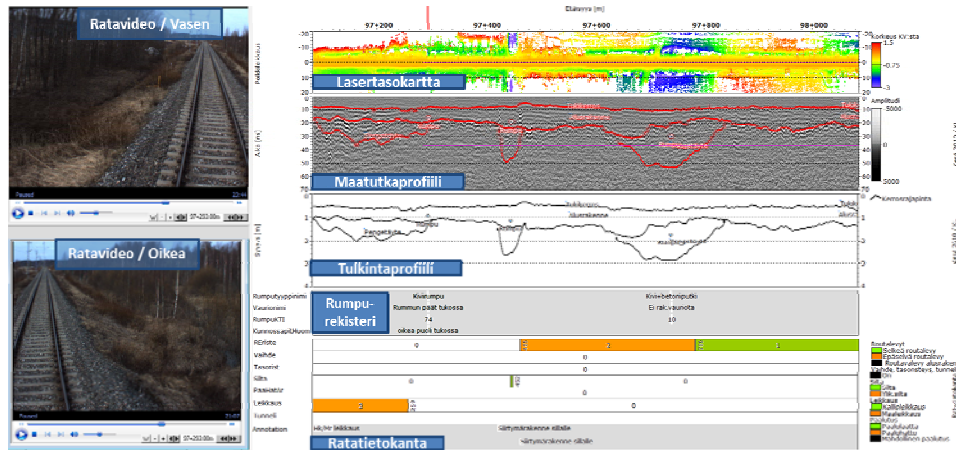


Kuva 90. Esimerkki tulosprofiilista, jossa on maatutkatulkinnan lisäksi esitetty ratapylväiden sijainnit, kaapelikourun etäisyys keskilinjasta, ratarekisteri sekä toimenpidesuunnitelma.

Rumpu- ja siltarekistereissä esitetään rumpujen ja siltojen sijainnit sekä niistä tehdyt kuntoarviot taulukko- ja kuvamuodossa (kuva 91). Esittämällä samaiset rekisteritiedot profiililla voidaan tietoja tarkastella helposti muun mittausaineiston kanssa, mikä mahdollistaa tietojen tehokkaan käytön rataa koskevan suunnittelun lähtötietoina. Kuvan 92 esimerkissä ratavideo-, laser-, maatutka- ja ratatietokanta-aineistot on esitetty yhdessä rumpurekisteritiedon kanssa. Maatutkakuvasta nähdään rakenne-tulkinta ja rummun syvyys. Molempien ojien (vasen/oikea) ratavideoilta ja laser-tasokartasta voidaan tarkastella kuivatuksen kuntoa ja kasvillisuuden määrää ojissa. Menettelyllä ei voida korvata rumpujen visuaalista tarkastusta, mutta aineiston esittäminen tehostuu ja rumpurekisteriä voidaan paremmin hyödyntää esimerkiksi kuivatuksen suunnittelussa ja muun kunnossapidon ohjelmoinnissa.

Km:raj	Rumpunimi	Rumputyyppi	Täyttöaste	Ojan kunto	Vaurio	Rumpu KTI	Kunnossapitäjän huomiot	Erikoistarkastus ja ehdotettu toimenpide
0097+0295	Rumpu	1 Kivirumpu	3	0	1 Rummun päät tukossa	74	oika puoli tukossa	
0097+0741	Rumpu	3 Kivi+betoniputki	2	0	0 Ei rakenteellista vaurioita	10		
0098+0383	Rumpu	1 Kivirumpu	2	0	0 Ei rakenteellista vaurioita	10		
0099+0173	Rumpu	1 Kivirumpu	2	0	2 Täytöt valunut rummun sisään	16	reikä luiskassa vasemmalla	
0101+0471	Rumpu	2 Betoniputki	0	0	0 Ei rakenteellista vaurioita	0		
0101+0786	Rumpu	1 Kivirumpu	2	1	2 Täytöt valunut rummun sisään	21	vasemmalla lievä täyttämateriaalin valuminen	

Kuva 91. Esimerkki rummunhallintarekisterissä esitettävistä rummun ominaisuus- ja kuntotiedoista. (Liikennevirasto, 2010)



Kuva 92. Esimerkki rumpurekisterin tietojen esittämisestä muun mitatun tiedon yhteydessä.

Vastaavasti voidaan esittää myös routarekisterien taulukkomuotoiset tiedot (kuva 93) profiilimuotoisena tietona. Tulosten esittäminen profiililla muiden tietojen yhteydessä luo huomattavasti tehokkaamman syy-seuraussuhteiden tarkastelumahdollisuuden.

alkaa [km+m]	loppu [km+m]	Raide	Toistuva paikka	Nopeusraja 2011 [km/h]	Kilaukspak 2011 [mm]	Vuosi	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Arvioitu syy/syyt
103+815	103+845		x		11									x	27	Kulvatuksen ongelmat
103+820	103+835		x		11				x	x		x	x	x	22	Pohjamaan sekoittuminen
108+200	108+220												x		23	Jauhaantuminen tukikerroksessa
108+306	110+197		x										x		20	Riittämätön rakennerakennepaksuus
108+740	111+300		x	100	Tarkkailu									x	21	Maaeläkkäisten ja pengerten rajakohdat
118+750	118+762				10									x	30	Pakkaamäärä
123+580	123+710					x									23	Jauhaantuminen tukikerroksessa
128+507	129+185		x			x									40	Ei tietoa
128+919	128+925		x		7									x	23	Jauhaantuminen tukikerroksessa
															40	Ei tietoa

Keltainen solu ilmaisee uutta vuonna 2011 routittua kohtaa.

Kuva 93. Esimerkki routarekisterissä esitettävistä tiedoista taulukkomuodossa. (Liikennevirasto, 2011)

Kuvassa 94 nähdään esimerkki, jossa routatiedot esitetään yhdistetysti muun mittauksien kanssa. Yhdistetyn tietojen tarkastelun avulla routamisen syiden analyysi on mahdollista tehdä huomattavasti tarkemmin, ja ongelmien korjaussuunnittelu voidaan tehdä täsmällisesti ongelmakohteen alueelle. Jos esitettyjen tietojen lisäksi tarkasteltaisiin radantarkastustietoa, saataisiin samassa näkymässä tietoa myös radan toiminnallisesta kunnosta rakenteellisen kunnan lisäksi.



syysjaottelun mukaisesti tyypillisten routaongelmakohteiden syiden havaitsemista maatutka-aineiston ja muun aineiston yhdistetyssä tarkastelussa.

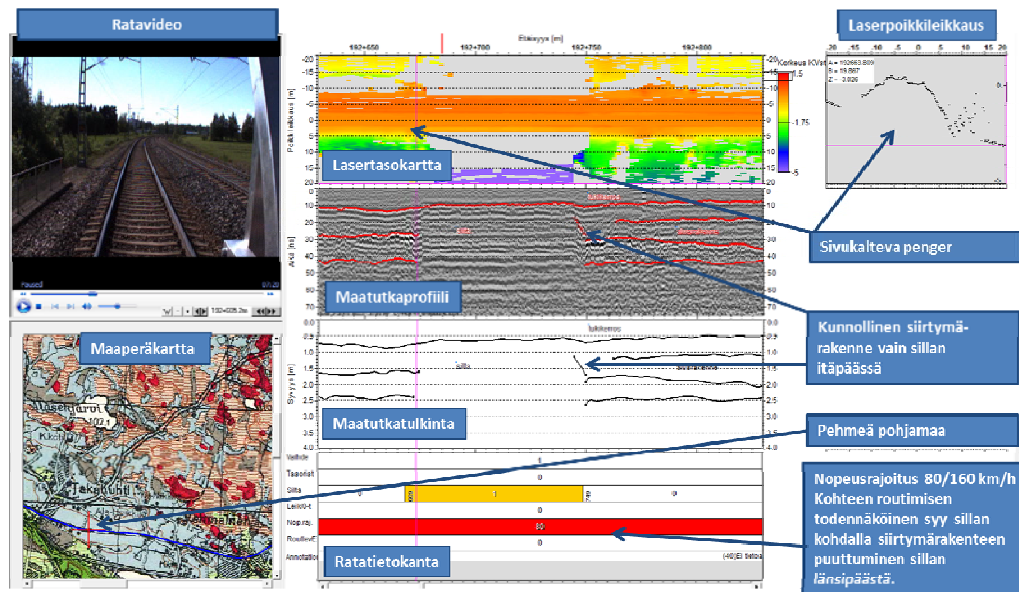
### 6.2.2 Epäjatkuvuuskohdat

Siltojen päiden epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat raiteen epätasaisuutta erityisesti kohteilla, joissa siirtymärakenteet ovat puutteellisia tultaessa pehmeään pohjamaan alueelta jäykälle siltarakenteelle. Maatutkalla voidaan tarkastella esimerkiksi siirtymärakenteiden olemassaoloa ja niiden pituutta. Myös pohjamaan arvioinnista silta-kohteella on apua ongelman arvioinnissa.

Rumpujen aiheuttamien pistemäisten routanousuongelmien lisäksi rummun kohta voi aiheuttaa myös painumaa sulan maan aikana. Maatutkan avulla rumpujen sijainti ratalinjalla voidaan paikantaa. Kosteusprofiiliin ja videon avulla voidaan myös kuivatuksen toimintaa tarkastella. Myös tasoristeys- ja vaihderakenteet näkyvät maatutka-aineistossa ja ylikäytävien alueet voidaan kartoittaa videota apuna käyttäen.

Yhteistä näille kaikille epäjatkuvuuskohdille on se, että kohteet voidaan paikantaa ja niiden rakenteita voidaan tarkastella maatutkan, ratavideon sekä laserkeilausaineiston avulla, mutta todellisen raiteen tasolle heijastuvan ongelman esiintymistä ja suuruutta on vaikea mitata ilman tietoa radan tasaisuudesta ja sen muutoksista eri vuodenaikoina. Täten tulee tarkastella myös ratageometrian mittaustuloksia.

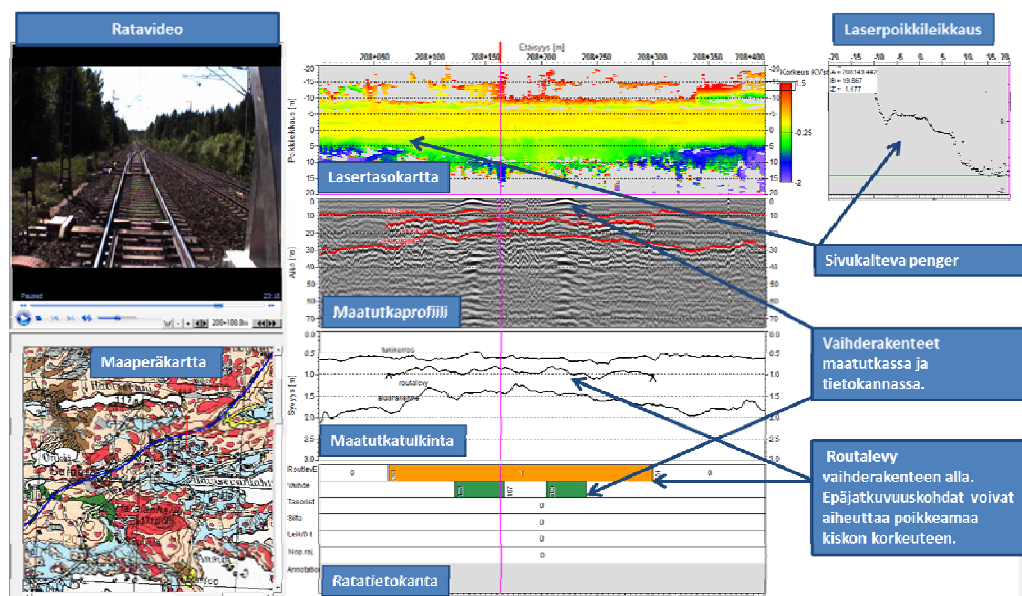
Kuvassa 95 on esitetty maatutkaprofiili routaongelmia aiheuttavaksi koetulta silta-kohteelta. Kohde on maaperäkartan ja maatutka-aineiston perusteella savi-/siltti-pohjamaalla. Maatutka-aineiston perusteella sillan länsipäästä puuttuu siirtymärakenne, jolloin epäjatkuvuuskohta aiheuttaa ongelmia radan tasaisuudessa sillan länsipäässä, mutta ongelmat ovat pääosin vuodenaikasta riippumattomia.



Kuva 95. Esimerkki epäjatkuvuuskohdan tarkastelusta maatutka-aineiston, rata-videon sekä laserkeilauksen perusteella.



Kuvassa 96 on esitetty vaihderakenteen sekä vaihteen alla olevan routalevytyksen näkyminen maatulka-aineistossa. Molemmat voivat rakenteen epäjatkuvuuskohtana aiheuttaa radan korkeuspoikkeaman muutoksia. Vaihteet näkyvät selkeinä heijasteina maatulka-profiilin pintaosassa. Hyväkuntoinen routalevy maarakenteita harvempina materiaalina näkyy selkeänä voimakkaana heijasteena tukikerroksen alta. Vaihdealueen ongelmia tarkasteltaessa tulee huomioida, että vaihdealueen routimisen ohella ongelman syynä voi olla myös se, että vain vaihdealueen ympäristö routii tai ongelma ei ole lainkaan roudasta riippuvainen. Edellä mainittujen ongelmien havaitsemiseksi olisi tärkeää saada tietoa kiskon pinnan tasolla tapahtuvista muutoksista eri vuodenaikoina.



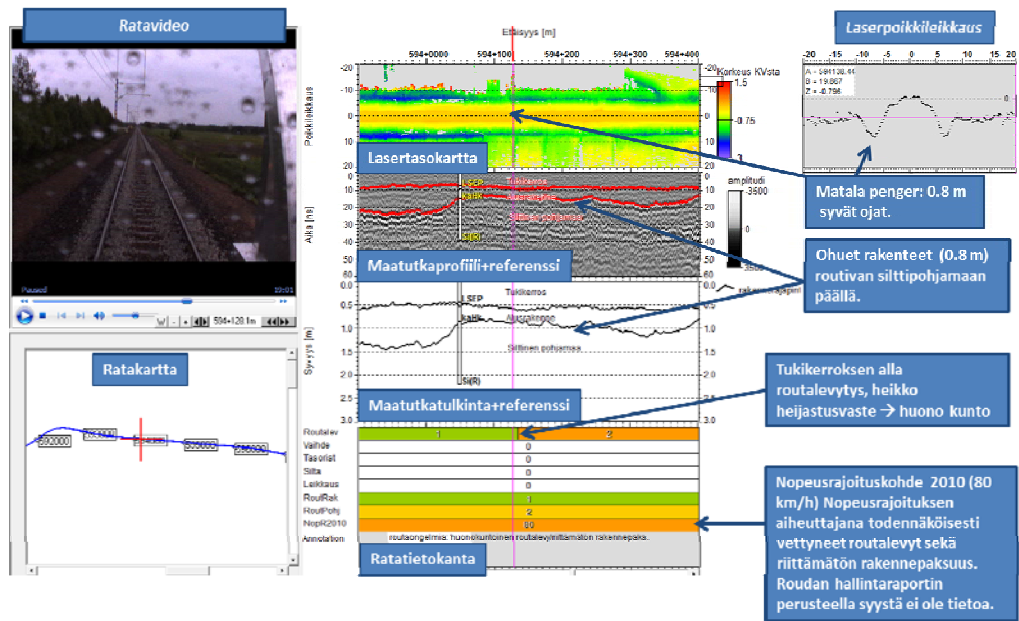
Kuva 96. Vaihderakenteen sekä routalevyyn näkyminen maatulka-aineistossa

### 6.2.3 Riittämätön rakennepaksuus

Maatutkan avulla ratarakenteen paksuus voidaan määrittää jatkuvana profiilina ja tuloksia voidaan tarkastella yhdessä videon ja laserkeilausaineiston kanssa. Tuloksina saatavien rakennekerrostulkintojen tarkkuus on  $\pm 5\%$  kerrospaksuudesta, joka 2 metrin kerroksilla tarkoittaa  $\pm 0,1$  metrin kerrospaksuuden määrittystarkkuutta. Jos tulkinnassa on käytettävissä routanäytteenotto tai koekuoppatuloksia, tulosten tarkkuutta voidaan edelleen parantaa. Tulosten perusteella saadaan tietoa riittämättömien rakennepaksuuksien jaksoista sekä myös rakenteen alla olevan pohjamaan tyyppistä. Rakennepaksuuden lisäksi on syytä tarkastella myös kuivatuksen toimivuutta.

Kuvassa 97 on esimerkki vuoden 2010 nopeusrajoituskohteesta, jossa maatulkatulkinnan ja referenssikairauksen perusteella nähdään kokonaisrakennepaksuuden olevan vain noin 0,8 m ja pohjamaan olevan silttiä. Kohteessa on vanha routalevytyks, mutta maatulkaheijasteen perusteella se on vettynyt ja huonokuntoinen. Routimisen todennäköinen syy kohteessa on riittämätön rakennepaksuus routivalla pohjamaalla ja routalevyjen huono kunto. Arviota tukee myös se, että kohteella ei ole aiempina lauhempina vuosina ollut rajoituksia.



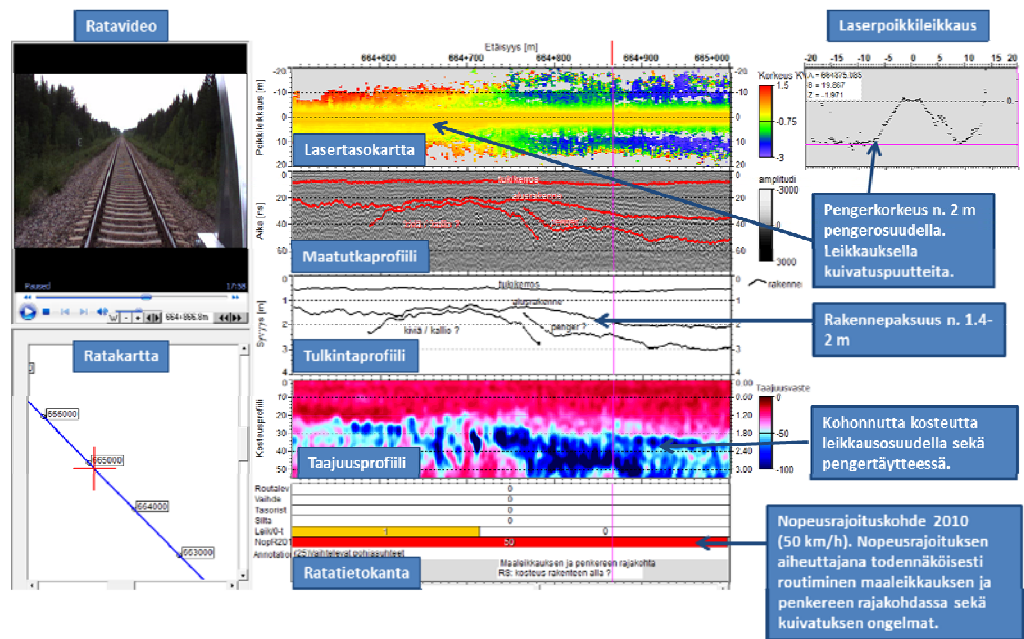


Kuva 97. Riittämättömän rakennepaksuuden havaitseminen maatutka-aineistosta

#### 6.2.4 Maaleikkausten ja pengerten rajakohdat

Vaihtelevan pohjamaan aiheuttamat routanousu- ja painumaerot voivat aiheuttaa ongelmia kiskon tasolle varsinkin, jos kohteiden siirtymärakenteet puuttuvat tai niitä ei ole rakennettu ohjeiden mukaisesti. Erityisesti kohteet, joissa maaleikkaukselta siirrytään penkereelle, ovat ongelmallisia routanousuerojen suhteen. Kuva 98 esittää esimerkkiä vuoden 2010 nopeusrajoituskohteesta, jossa routimiso ongelmia aiheuttaa leikkauksen ja penkereen rajakohta. Kuvassa nähdään kerrospaksuuden muutoksen lisäksi taajuusprofiilin perusteella kohonnutta kosteuspitoisuutta pohjamaassa sekä pengertäytteessä.

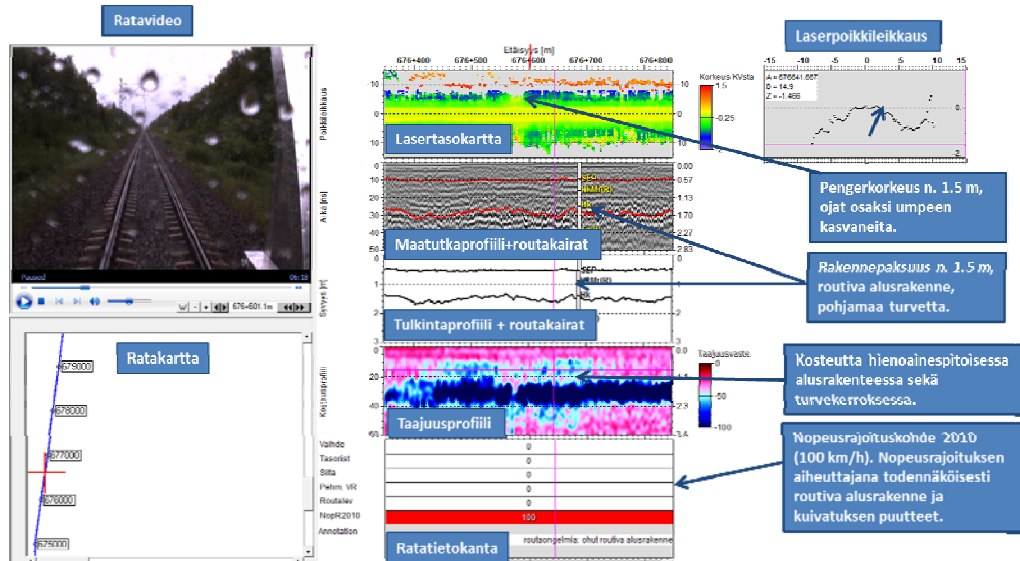
Maatutkan perusteella voidaan nähdä kerrospaksuuksien vaihtelu tarkastelujaksolla sekä myös pengertäytteen pohja. Useasti maaleikkausten ja pengerten rajakohdilla esiintyy myös penkereen painumaa, joka ei ole vuodenajasta riippuva ilmiö, vaan ajan suhteen kehittyvä geotekninen ongelma. Maatutkasta tulkittua penkereen pohjan syvyyttä ja laserkeilauksesta mitattua pengerkorkeustietoa vertaamalla voidaan arvioida penkereen painumista. Tarkempia mittauksia varten tarvitaan penkereen painumisen monitorointia.



Kuva 98. Vuoden 2010 nopeusrajoituskohde routivan maaleikkauksen ja penkereen rajakohdassa.

### 6.2.5 Routiva alusrakenne ja pohjamaan sekoittuminen

Erityisesti vanhoissa ratarakenteissa alusrakenteen sisältämä hienoaines voi aiheuttaa rakenteen routimista. Myös pohjamaan sekoittuminen rakennekerrokseen aiheuttaa ongelmia alusrakenteessa, joka sekoittumisprosessin seurauksena muuttuu routivaksi materiaaliksi. Jos routiva alusrakenne saa vettä routiakseen, se voi aiheuttaa routanousua aiemmin keväällä kuin pohjamaasta johtuva routiminen. Routimisherkin alusrakenteen tunnistamisen maatutkaheijasteesta voidaan tehdä maatutkan taajuusspektriä analysoimalla (vrt. luku 5.3). Kuvassa 199 on esitetty esimerkki routivan alusrakenteen havaitsemisesta maatutka-aineistosta. Taajuusprofiilissa nähdään korkeaa kosteuspitoisuutta ja routimisherkkyyttä indikoivia arvoja (siniset alueet) alusrakenteessa. Myös samalta profiililta otetuista näytteistä havaittiin hienoaines-pitoista ja routivaa alusrakennemateriaalia.

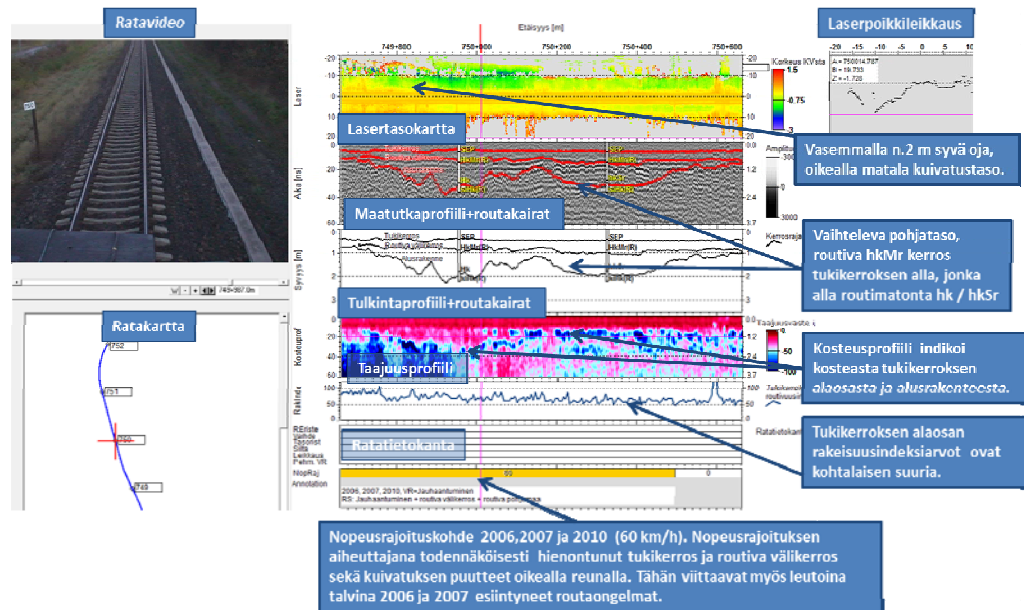


Kuva 99. Vuoden 2010 nopeusrajoituskohte routivan alusrakenteen jaksolla.

## 6.2.6 Jauhaantuminen tukikerroksessa

Tukikerroksen kohonnut hienoainespitoisuus on Roudanhallintaraportissa suurin arvioitu routaan liittyvä ongelma. Ikääntynyt tukikerros on syklisen kuormituksen alla jauhaantunut hienorakeisemmaksi materiaaliksi, joka saadessaan vettä routii. Vesi voi olla peräisin joko rakenteen yläpuolelta sulamisveden ja sateen mukana tai vaihtoehtoisesti alemmista kerroksista esimerkiksi huonon kuivatuksen johdosta muun muassa matalissa leikkauksissa.

Kuvan 100 esimerkissä nähdään laser- ja maatutka-aineiston lisäksi maatutkasignaalia laskettu rakeisuusindeksi sekä taajuusprofiili nopeusrajoituskohteessa, jossa routaongelman aiheuttajaksi on arvioitu tukikerroksen kohonnutta hienoainespitoisuutta. Tulosten perusteella kohteessa rakeisuusindeksi on kohonnut ja taajuusprofiilia tarkasteltaessa huomataan kohonneita arvoja tukikerroksen alaosassa, mikä viittaa kerroksen sisältävän kosteutta sitovaa hienoaainesta.



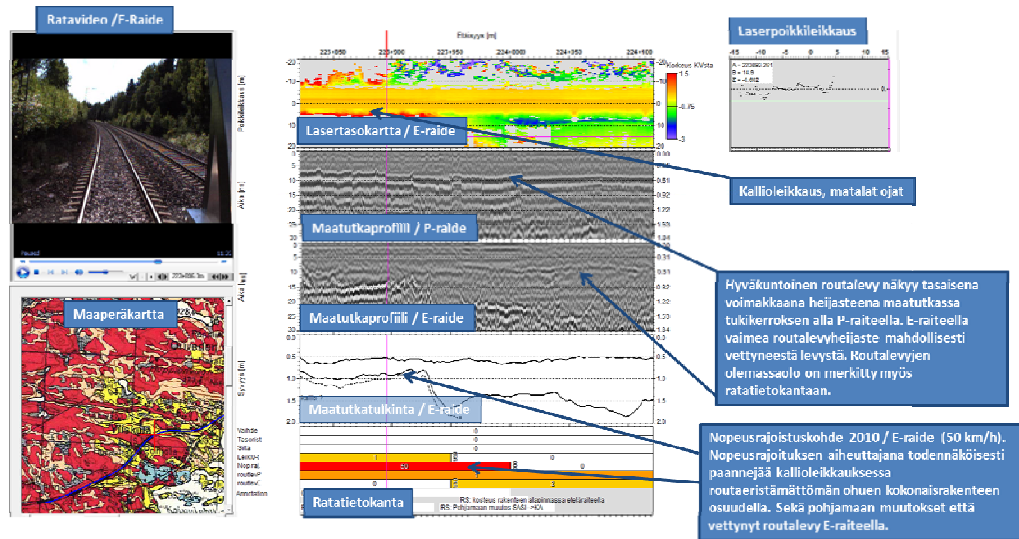
Kuva 100. Esimerkki nopeusrajoituskohteesta, jossa jauhautunut tukikerroksen alaosa voi aiheuttaa routaongelmia myös leutoina talvina.

### 6.2.7 Vanhat vettyneet routaeristeet

Routalevyjä on asennettu rataverkolle jo vuodesta 1970 lähtien. Niiden laatu on parantunut ajan myötä, mutta aiemmin asennettujen vanhojen levyjen paksuus ja eristemateriaali ovat vaihdelleet. Huonolaatuinen routalevymateriaali vettyy ja menettää lämmönvastustaan merkittävästi. Tällöin routa pääsee tunkeutumaan syvemmälle kuin se on alun perin mitoitettu. Alhaisen jäykkyyden omaavat routalevytyypit voivat olla palautuvan kokoonpuristumansa myötä ongelmallisia myös ilman roudan aiheuttamia ilmiöitä.

Routalevyn sähköiset ominaisuudet poikkeavat huomattavasti maaperän ominaisuuksista ja tämä aiheuttaa maatutka-signaaliin voimakkaan heijasteen. Heijasteen polariteetti on negatiivinen, mikä johtuu eristeen sisältämästä ilmasta. Vettynyt routalevy ei sisällä ilmaa samassa määrin kuin uusi toimiva routalevy. Maatutkaheijasteen vasteen perusteella routalevyn kuntoa ja myös sijaintia voidaan tutkia, mikä on tärkeää erityisesti tukikerroksen puhdistusta suunniteltaessa. Sepelinpuhdistuksen yhteydessä puhdistustason yläpuolella olevat routalevyt täytyy poistaa ennen operaatiota.

Kuvassa 101 on esitetty esimerkki maatutka-aineistosta kaksoisraideosuudelta. Pohjoisraiteella on alle viisi vuotta sitten asennettu uusi routalevy tukikerroksen alapuolella. Routalevy aiheuttaa vahvan negatiivisen polariteetin (mustan) ja suhteellisen tasaisen heijasteen routalevyn yläpintaan johtuen tukikerroksen ja routalevyn dielektrisyyskontrastista. Eteläraiteella on profiilin loppuosassa näkyvissä vaimea epätasainen heijaste tukikerroksen alta, joka indikoi haurastuneesta ja huonokuntoisesta routalevystä.



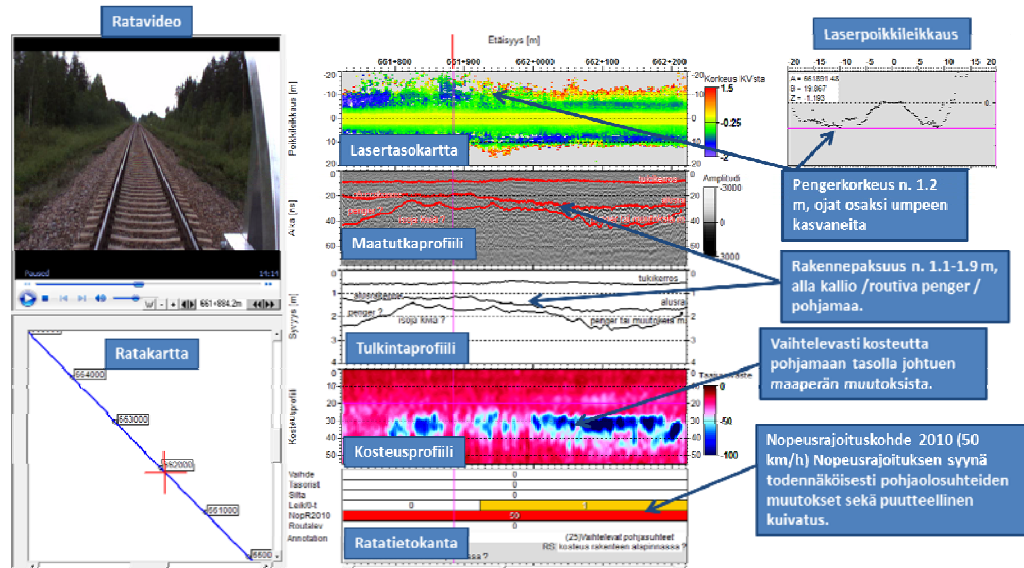
Kuva 101. Esimerkki routalevyjen havainnoimisesta maatutka-aineistosta nopeusrajoituskohteella ja sen ympäristössä.

## 6.2.8 Vaihtelevat pohjasuhteet

Vanhat rataosat on rakennettu rakennusajankohdan vallitsevien ohjeistusten mukaisilla parhailla materiaaleilla ja menetelmillä. Usein esimerkiksi rakennepaksuudet eivät täytä nykyvaatimuksia routimattomille rakenteille. Radat on myös rakennettu myöten olemassa olevan maaston muotoja, jolloin ratarakenteiden paksuus voi vaihdella lyhyellä matkalla hyvinkin paljon, mikä voi aiheuttaa ongelmia pohjamaan routivuuden vuoksi. Lisäksi eri pohjamaalajien kantavuudet rakenteen alla voivat aiheuttaa epäjatkuvuuskohtia rakenteelle.

Maatutkaluotausprofiilin avulla pystytään tulkitsemaan jatkuva rakenneprofiili radasta ja paikantamaan vaihtelevien pohjasuhteiden alueet. Myös laserkeilausaineiston ja ratavideon avulla voidaan havainnoida rataympäristöä ja pohjaolosuhteita. Kuvassa 102 on esitetty nopeusrajoituskohteelta rataosuudelta, jossa routimisen syyksi on arvioitu vaihtelevia pohjasuhteita. Maatutkaprofiilista nähdään tukikerroksen olevan tasalaatuista ja paksuista, mutta alusrakennekerroksen paksuus vaihtelee lyhyellä matkalla 1,1–1,9 metrin välillä. Kohde on vaihtelevasti routivalla pohjamaalla ja osassa kohdista routa tunkeutuu routivaan pohjamaan tai pengertäytyteeseen aiheuttaen routanousua, kun taas paksumman kokonaisrakennepaksuuden jaksoilla routanousu estyy riittävän rakennepaksuuden sekä routimattoman pohjamaan ansiosta. Samassa kuvassa nähdään myös 2D-laserkeilausaineistosta ja ratavideosta että kohde sijaitsee alueella, jossa maanpinnan korkeus vaihtelee leikkausten ja penkereiden vuoksi. Tätä tietoa voidaan käyttää maatutkatulkinnan tukena määrittäessä rakenteiden paksuuksia.





Kuva 102. Esimerkki vaihtelevien pohjaolosuhteiden näkymisestä nopeusrajoituskohteessa.

### 6.2.9 Kuivatuksen ongelmat

Yksi suurimmista routaongelmien aiheuttajista on huono kuivatus. Routimisesta johtuvat häiriöt ovat yleensä moniongelmaisia ja pelkkä yhden routimista aiheuttavan tekijän poistaminen ei aina poista ongelmaa. Kuitenkin kuivatuksen toimivuuteen vaikuttaminen on yksi tehokkaimmista routimista estävistä kunnostustoimenpiteistä. Kuivatuksen toimivuutta voidaan tarkastella maatutkaluotauksen, ratavideon sekä 2D-laserkeilausaineiston yhdistetyllä analyysillä. Kuivatuksen kunnostuksella saadaan routaongelmat vähenemään, kun routivan aineksen ei saa routimiseen vaadittua kosteutta rakenteiden alapuolelta.

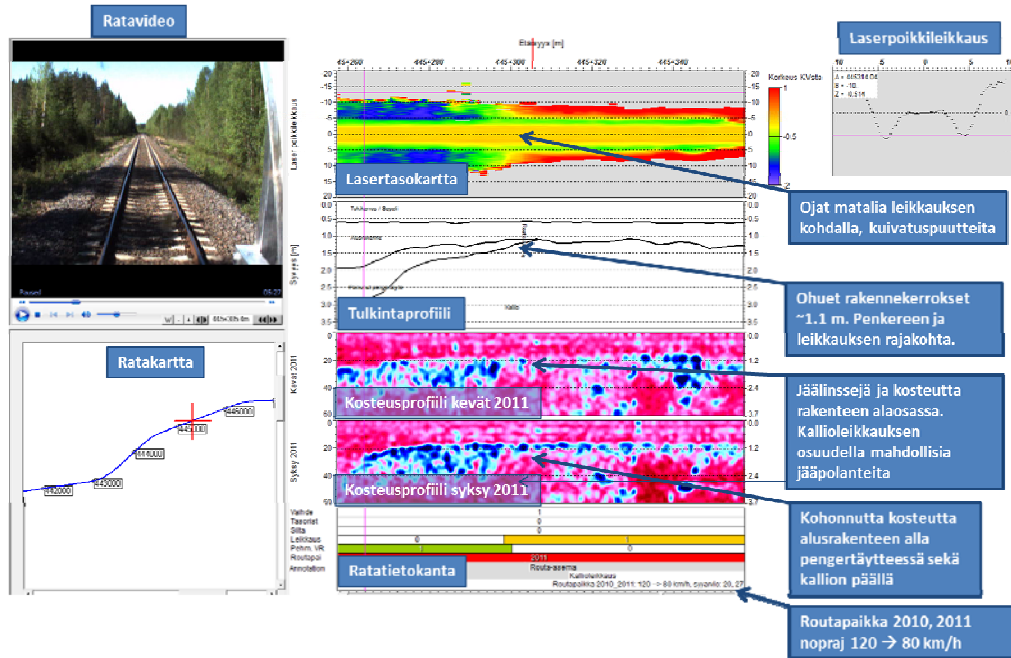
Parhaiten kuivatuksen ongelmat havaitaan vertaamalla kevät- ja syksymittausten aineistoja toisiinsa erityisesti kosteusprofiilin osalta. Kuivatuksen toimivuuden arvioinnissa voidaan käyttää lisäksi ojitusvyöhyden ja ojien kunnon havainnointia laserkeilausaineistosta ja ratavideosta sekä pengerkorkeuden ja rakennekerrospaksuuksien vertailua maatutkatulkinnoista ja laserpoikkileikkauksesta.

Kuvassa 103 on esitetty routatutkimusasemakohteen maatutkaus- ja rakennetulkintojen tulokset. Tulosten perusteella nähdään routamittausaseman sijaitsevan penkereen ja kallioleikkauksen rajakohdassa. Maatutkan perusteella pohjamaa penkereen alla on todennäköisesti routivaa. Tukikerroksen paksuus on keskimäärin 0.60 m ja alusrakenteen alapinnan syvyys vaihtelee 1-2 metrin välillä. Maatutkatulosten perusteella kokonaiskerrospaksuus on noin 1.1 m routa-aseman kohdalla. Laserkeilaustuloksista voidaan nähdä ojien olevan matalia ja niiden syvyys on kokonaisrakennepaksuutta matalampi.

Kosteusprofiilien perusteella tukikerros on suhteellisen karkearakeista eikä aiheuta jään muodostumista kevätmittauksissa. Myös syksyn mittauksissa tukikerroksen alapinnassa on vain hieman kosteutta. Alusrakenteen ja pohjamaan tai pengertäytteen rajapinnassa voidaan havaita jäätymisvyöhykkeen aiheuttamia kosteuspoikkeamia talviaineistossa. Kesäaineistossa nähdään kosteutta samoissa kohdissa. Myös kallioleikkauksen osalla näkyy kosteuspoikkeamia molemmissa aineistossa, mikä viittaa kallioleikkauksen ja alusrakenteen alapinnan läheisyyteen mahdollisesti muodostu-



vaan paannejäähän. Tulosten perusteella kohteessa on suuri todennäköisyys routa-ongelmille, jotka johtunevat ohuista rakennekerroksista routivalla pohjamaalla, paannejäästä kallioleikkauksesta sekä kuivatuspuutteista.



Kuva 103. Kuivatuspuutekohteen tarkasteluesimerkki.

#### 6.2.10 Muut ongelmat

Maatutkan avulla voidaan myös aiemmin "Ei tietoa"-maininnalla luokiteltujen kohteiden routimisen syyt useimmiten selittää tai ainakin löytää todennäköisin routimisen aiheuttaja. Yleisin primäärisyy on liian ohuet rakennekerrokset. Maatutkan lisäksi on tarpeen analysoida myös radantarkastusvaunun mittausaineiston kausittaista vaihtelua.

## 7 Yhteenveto

Jotta radan rakenteellisten ongelmakohteiden kunnossapito voitaisiin suunnitella mahdollisimman tehokkaasti, on ensiarvoisen tärkeää saada jatkuvaa paksuus- ja laatu-tietoa kunnostettavasta kohteesta. Niiden avulla voidaan tehokkaasti selvittää ongelmien aiheuttaja ja valita oikea korjaustoimenpide.

Maatutka on nopea ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä radan rakennekerrosten paksuuksien ja rakenteiden sekä pohjamaan laadun määrittämiseen. Maatutkan avulla ratarakenteita voidaan tarkastella pintaa syvemmältä havainnoiden samanaikaisesti ratavideon ja laserkeilausaineiston perusteella rataympäristöä muun muassa kuivatuksen, erikoisrakenteiden ja leikkausten osalta. Kokonaisvaltaisella rataympäristön huomioimisella radalla esiintyviä ongelmia voidaan tehokkaasti tarkastella ja suunnitella niille kustannustehokkaita ja kestäviä korjaustoimenpiteitä. Jatkuvan tiedon avulla voidaan myös pistemäiset lisätutkimukset kohdistaa oleellisiin kohtiin, ja niiden määrää voidaan useissa tapauksissa vähentää säännöllisin välein tehtäviin pohjatutkimuksiin verrattuna.

Maatutkaprofiilin taajuussisältöä tutkimalla voidaan arvioida tukikerroksen hienontuneisuuden lisäksi myös alusrakenteen ja pohjamaan kosteuspitoisuutta sekä routimisherkkyyttä ja näin paikantaa rakenteiden routivuudesta aiheutuvia ongelmakohtia. Rakenteissa ja pohjamaassa oleva kosteus, hienoaines ja jää aiheuttavat maatutka-aineistoon heijastepoikkeamia. Taajuusprofiilia analysoimalla voidaan paikantaa ja määrittää erilaisia ratojen rautaongelmia, niitä aiheuttavia rakenteita ja olosuhteita. Kesä- ja talviaikaan mitattua aineistoa vertaamalla voidaan saada tietoa rakenteiden kuivatuspuutteiden ja roudan aiheuttamista ongelmista. On tärkeä erotella mistä kerroksesta ja tekijästä ongelmat todennäköisimmin johtuvat, jotta korjaustoimenpiteet voidaan suunnitella oikean tyyppisiksi.

Mittausaineiston käsittely vaatii monipuolista tietojenkäsittelyohjelmistoa. Tässä julkaisussa esitetyt tulokset on tehty Railway Doctor -ohjelmistolla, joka mahdollistaa tehokkaan maatutka- ja muun rata-aineiston jatkokäsittelyn. Ohjelmiston avulla rata-tietokanta- ja näytetiedot voidaan esittää yhdistetysti samalla profiililla rakennetietojen kanssa. Digitaalisen videon, laserkeilausaineiston ja karttojen avulla saadaan informaatiota mittausympäristön olosuhteista ja voidaan paikantaa esimerkiksi siltojen, tasoristeysten ja vaihteiden sijainnit. Integroidun analyysin avulla ongelmapaikat voidaan määrittää tarkasti ja korjaus- sekä kunnossapitotoimenpiteet pystytään suunnittelemaan tarkasti oikeille kohdille.

Maatutka-aineiston analyysin pohjalta saadaan määritettyä ongelmarakenteiden sijainti, mutta jotta nähdään heijastuvatko pohjamaan ja rakenteiden poikkeamat kiskoon, tuloksia täytyy tarkastella yhdessä eri mittausajankohtina tuotetun ratageometriatiedon kanssa. Nykytietämyksellä maatutkauksen avulla voidaan tarkastella taulukossa 7 esitettyjä rakennetietoja.

*Taulukko 7. Maatutkalla tarkasteltavat rakenne- ja laatutiedot sekä niistä saatava informaatio.*

<b>Rakenne</b>	<b>Rajapinta (kulkuaiikatarkastelu)</b>	<b>Laatu (taajuustarkastelu)</b>
<b>Tukikerros</b>	Tukikerrospaksuus	Rakeisuusindeksi Kesämittaus
<b>Routalevy</b>	Routalevyn sijainti pituus- ja syvyys suunnassa.	Taajuusprofiilianalyysin perusteella mahdollisesti vettymisaste. Kesämittaus
<b>Alusrakenne</b>	Alusrakennepaksuus, erikoisrakenteiden paikannus mm. rummut, paalurakenteet	Taajuusprofiilianalyysin perusteella. Kesä- & talvimittausvertailu.
<b>Pohjamaa</b>	Pohjamaan pinta sekä pohjamaan karkearakeiset kerrokset, turvekerros	Taajuusprofiilianalyysin perusteella. Kesä- & talvimittausvertailu.
<b>Kallio</b>	Kallion yläpinta, kun kallion päällä on karkeaa maainesta.	Paannejääkohteet kallioleikkauksissa. Kesä- & talvimittausvertailu.

## Viitteet

Annan, A.P., 2003, Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications. Sensors & Software Inc. Technical Paper.

Daniels, D. T., 1996. Surface penetrating radar, The Institution of Electrical Engineers, United Kingdom, London, 300 pp.

ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering) Technical Committee on Frost, TC-8. 1989. Work report 1985-1989. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, Finland, 13-15.3.1989. Espoo, VTT. Vol 1, pp. 15-70.

Liikennevirasto, 2010-2012 Rumpu-, roudanhallinta- sekä kiskovikarekisterit.

Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2002. Ratarakenteen routasuojaus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. Helsinki, Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. 101 s., 1 liite.

Nurmikolu, A. 2005. Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track. PhD thesis. Tampere University of Technology, Publication 567. 235 p., 6 app.

Ratahallintokeskus, 2002a. Ratojen routasuojaustarpeen selvittäminen, tutkimusohje. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 8. Helsinki. 14 s., 3 liitettä.

Ratahallintokeskus, 2002b. Ratatekniset ohjeet, Osa 15, Radan kunnossapito. 63 s.

Ratahallintokeskus, 2006. Käyttöönotto-ohje. Investointien ja kunnossapidon suunnittelussa huomioitavat ja vastaanotossa vaadittavat testit ja dokumentit. Ratahallintokeskuksen toimintaohje. 42 s.

Ratahallintokeskus, 2008. Ratatekniset ohjeet, Osa 3, Radan rakenne. 50 s., 3 liitettä.

Ratahallintokeskus, 1997. Tukikerroksen laadun tutkimusohje. 3 s.

Saarenketo, T., 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys, PhD thesis. University of Oulu, 121 p. + 6 app.

Silvast, M., Nurmikolu, A., Wiljanen, B. and Levomäki, M., 2010. An inspection of railway ballast quality using ground penetrating radar in Finland. Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 224 (F5), DOI 10.1243/09544097JRR367, pp. 345-351.

Silvast, M., Nurmikolu, A., Wiljanen, B. & Levomäki, M. 2012. Identifying frost-susceptible areas on Finnish railways using GPR technique. Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, June 27, 2012. DOI 10.1177/0954409712452076.







